차 례

제 5 장. 원자의 구조 114

제 6 장. 원자핵과 소립자 136

제 7 장. 여러가지 매질속에서의 전류 180

제 8 장. 물리학의 최신성과, 나노기술의 기초 226

실 험 266

참고

자료

일화

머 리 말

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

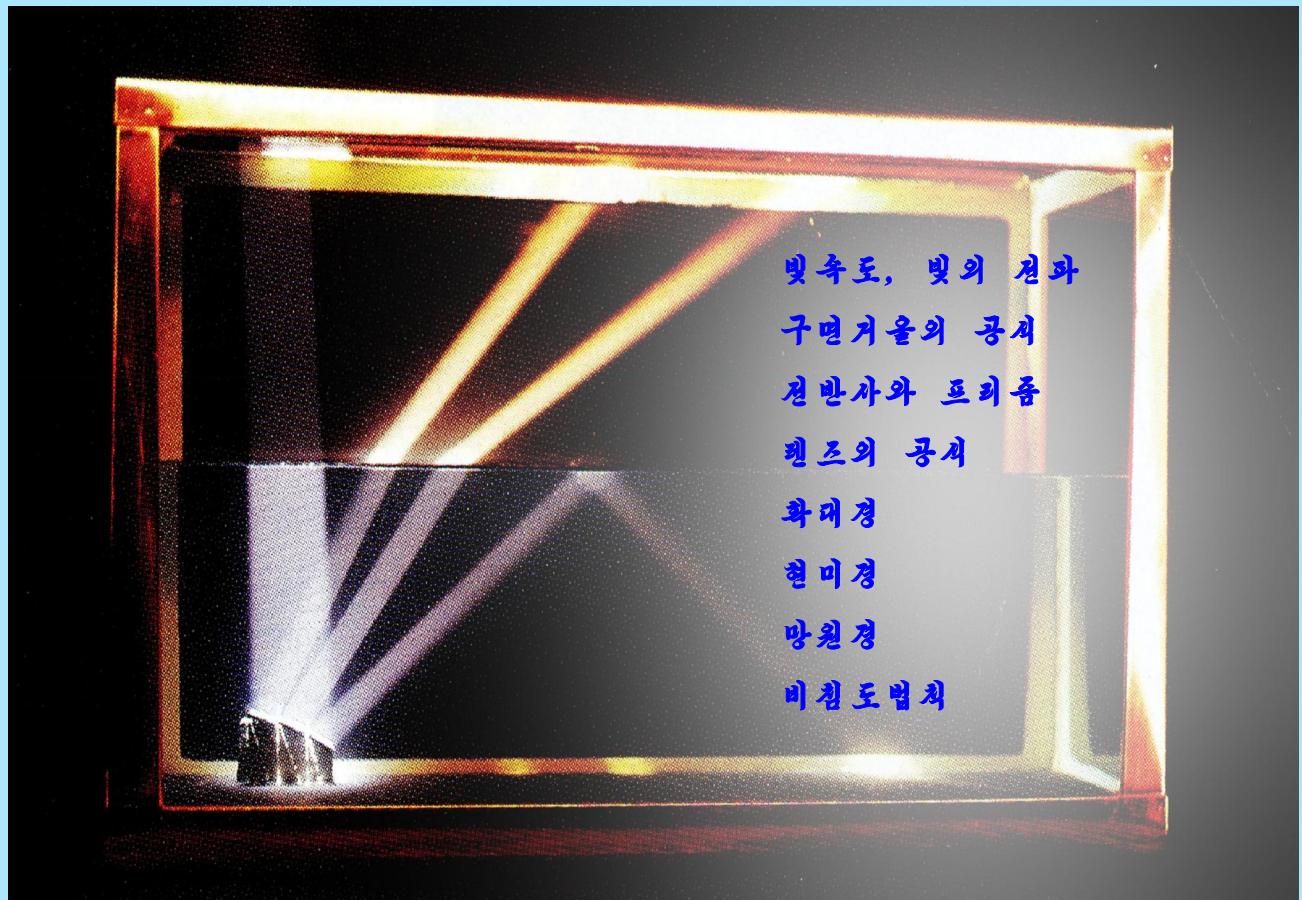
《과학과 기술을 빨리 발전시켜야 합니다. 현시대는 과학과 기술의 시대인것만큼 과학과 기술을 발전시키지 않고서는 경제를 한걸음도 전진시킬수 없습니다.》

새로운 과학분야들을 개척하고 최신과학기술의 성과를 인민경제에 널리 받아들이는데서 물질의 원자적구조와 물질의 성질에 관한 현대물리학의 기초원리를 잘 아는것이 매우 중요하다. 그것은 과학과 기술의 최신성과가 바로 여기에 뿌리를 두고있기때문이다.

물리학이 발생발전하여오는 과정에 그 연구대상이 부단히 변화되였으나 그 어느때에도 물질과 에네르기의 두 분야만은 놓치지 않았다.

6학년에서는 물질의 구조에 관한 현대적인 리론, 물질의 성질과 그 리용에서 제기되는 최신성과들에 대하여 학습한다.

물질의 구조는 물질이 내는 빛과 깊이 련관되여있으며 상대성리론의 출발이 빛속도에 대한 가정으로부터 시작되여있으므로 빛의 직진성과 파동성을 먼저 학습한다.

또한 상대성리론과 물질의 2중성, 원자와 핵의 구조 및 특성, 여러가지 물질들과 그 리용에 대하여 학습하게 된다.

학생들은 열심히 공부하여 과학기술의 성과로써 위대한 **김일성**조국, **김정일**장군님의 나라를 경애하는 **김정은**선생님의 령도따라 세계만방에 빛내여나가는데 적극 이바지하는 혁명인재로 자라나야 한다.

제1장. 기하광학

광학은 빛의 성질과 빛에 의하여 일어나는 현상들을 연구하는 물리학의 한 분야이다. 빛이 공간으로 퍼져나가는것을 살펴볼 때 빛을 빛선들의 묶음으로 보고 기하학적으로 취급할수도 있는데 광학의 이러한 부문이 기하광학이다.

기하광학은 여러가지 광학기구들을 설계제작하고 효과적으로 리용하는데서 중요한 기초리론이다.

이 장에서는 빛의 직진법칙, 반사와 굴절법칙 등 기본원리와 구면거울과 렌즈에서 물체의 영상의 특징, 눈을 보충해주는 여러가지 광학기구들의 작용원리를 학습한다.

제 1 절. 빛속도, 빛의 전파

빛 속 도

광원에서 나온 빛은 사방으로 매우 빠른 속도로 전파된다.

사람들은 처음에는 빛이 무한히 큰 속도로 전파된다고 생각하였다. 그것은 빛이 지구상에서 멀리 떨어진 두 지점사이로 순간적으로 전파되므로 빛이 전파되는 매우 짧은 시간을 잴수 없었기때문이였다. 그후 매우 짧은 시간을 잴수 있는 여러가지 방법들을 생각하여 빛속도를 실험적으로 구하게 되였으며 오늘에 와서는 최신과학기술의 성과에 기초하여 빛속도가 정확하게 결정되였다.

빛은 진공속에서 $c=2.99792458\times10^8$ m/s$\approx3\times10^8$ m/s의 속도로 전파된다.

진공속에서 빛의 전파속도는 물리학에서 중요하게 리용하는 상수이다.

매질속에서 빛의 전파속도는 어떻게 되겠는가.

매질속에서 빛속도는 진공속에서보다 작아진다. 이것을 특징짓기 위하여 굴절률이라는 물리적량을 도입한다. 진공속에서의 빛속도(c)보다 매질속에서의 빛속도(v)가 몇배 작은가를 표시하는 물리적량을 **굴절률(절대굴절률)**이라고 부른다.

$$n=\frac{c}{v}\qquad \text{굴 절 률}$$

몇가지 물질의 굴절률(λ=590nm인 경우)

물 질	굴절률	물 질	굴절률
공기	1.000 292	유리	1.47~2.04
물(20℃)	1.333	석영유리	1.458
알콜	1.364	수정	1.544
얼음	1.31	홍옥	1.76
		금강석	2.417

굴절률이 큰 매질은 광학적으로 **밴 매질**, 굴절률이 작은 매질은 광학적으로 **성긴 매질**이라고 부른다.

빛의 전파속도가 변할 때 $v=\lambda\nu$에서 λ가 변하는가, ν가 변하는가.

빛이 굴절률이 서로 다른 매질로 전파될 때 ν는 외부작용에 의한것이므로 변하지 않고 λ만 변한다. 진공속에서 빛의 파장을 λ_0이라고 하면 굴절률이 n인 매질에서 빛의 파장은 $\lambda=\frac{\lambda_0}{n}$이다.

빛의 전파법칙

빛은 진공속에서나 고르로운 매질속에서 곧추 전파된다. 즉 진공속에서나 고르로운 매질속에서 빛선은 직선으로 된다. 이것을 **빛의 직진법칙**이라고 부른다.

그림 1-1. 빛의 반사와 굴절

AO: 입사빛선, OB: 반사빛선, OC: 굴절빛선

α: 입사각, β: 반사각, γ: 굴절각

MN: 입사점에서 경계면에 세운 수직선(면의 법선)

 빛이 전파하다가 서로 다른 매질의 경계면에서는 어떻게 되겠는가.

빛은 서로 다른 매질의 경계면에서 일부는 반사되고 일부는 굴절된다.(그림 1-1)

입사빛선 AO와 입사점에서 경계면에 세운 수직선 MO로 이루어지는 평면을 **입사면**이라고 부른다.

빛이 반사, 굴절될 때 어떤 법칙이 성립하는가를 실험으로 알아보자.

실험

○ 그림 1-2와 같이 실험기구를 설치하고 광원에서 나오는 좁은 빛묶음을 공기와 유리의 경계면에 입사시킨다.

○ 입사각을 변화시키면서 반사각과 굴절각을 잰다.

○ 입사각의 시누스와 굴절각의 시누스값을 구하고 그것들의 비를 계산한다.

○ 입사빛선, 반사빛선, 굴절빛선이 놓이는 면을 살펴본다.

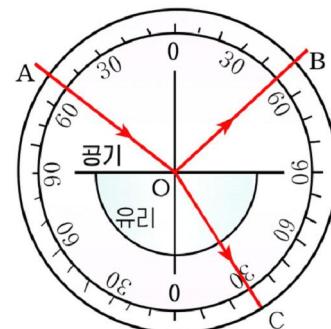



그림 1-2. 빛의 반사, 굴절법칙을 알아보는 실험

실험에서 빛이 서로 다른 매질의 경계면에서 반사, 굴절될 때 다음과 같은 법칙이 성립한다는것을 알수 있다.

반사빛선은 입사면우에 놓이며 반사각은 입사각과 같다. 이것이 **빛의 반사법칙**이다.

$$\alpha = \beta \quad \text{빛의 반사법칙} \qquad (1)$$

한편 굴절빛선은 입사면우에 놓이며 입사각의 시누스와 굴절각의 시누스의 비는 입사각의 크기에 관계없이 일정하다. 이것이 **빛의 굴절법칙**이다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n_{12} \text{ (일정)} \qquad \text{빛의 굴절법칙} \qquad (2)$$

식 2에서 n_{12}을 빛이 전파되는 첫째 매질에 대한 둘째 매질의 **상대굴절률**이라고 부른다.

계산에 의하면 n_{12}는 두 매질에서의 빛속도의 비 $n_{12} = \frac{v_1}{v_2}$와 같다.

상대굴절률은 절대굴절률, 빛의 파장과 어떤 관계에 있겠는가.

첫째 매질의 절대굴절률을 n_1, 둘째 매질의 절대굴절률을 n_2이라고 하면

$$n_{12} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \qquad (3)$$

※ 절대굴절률 n은 진공에 대한 주어진 매질의 상대굴절률과 같다.

매질의 굴절률로 빛의 굴절법칙을 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{n_2}{n_1}$$

빛의 굴절현상은 우리 주위에서 많이 찾아볼수 있다.

아지랑이가 왜 생기는가?

[례제] 물속 h만 한 깊이에 있는 물체를 내려다보면 물체가 얼마만한 깊이에 있는것처럼 보이겠는가?

풀이. 물체는 실제자리보다 떠올라 와있는것처럼 보인다.

그림 1-3의 ㄱ와 같이 굴절률이 n인 물속의 h만 한 깊이에 있는 점 P를 공기속에서 내려다볼 때 점 P′에 있는것처럼 보인다.

그림 1-3. 물체의 겉보기깊이와 겉보기높이

경계면에 거의 수직에 가깝게 나오는 두개의 빛선을 PBE와 PB′E′라고 하면 이 빛선들이 두눈에 들어온다. 그림에서 각 α와 γ가 매우 작으므로 $\sin\alpha \approx \tan\alpha$, $\sin\gamma \approx \tan\gamma$로 볼수 있으므로 다음 식이 성립된다.

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} \approx \frac{\tan\alpha}{\tan\gamma} = \frac{AB/P'A}{AB/PA} = \frac{PA}{P'A} = \frac{h}{h'}$$

여기서 h'는 물체가 떠올라와보이는 겉보기깊이 $h' = \frac{h}{n}$이다.

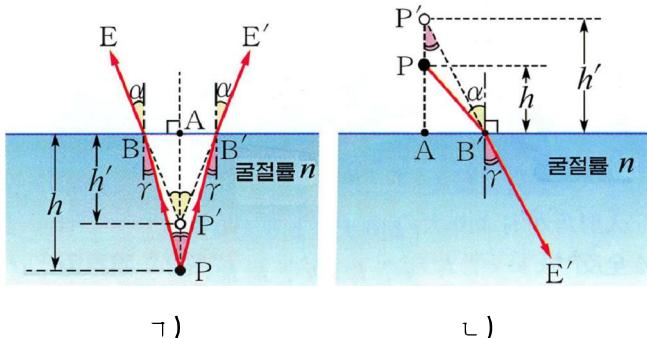



그림 1-3의 ㄴ와 같이 공기속의 점 P를 굴절률이 n인 물속에서 본다면 P′점으로 보이며 걸보기높이는 $h' = nh$로서 실제높이의 n배로 된다.

※ 첫째 매질이 굴절률이 n'인 매질이라면 걸보기높이는 $h' = \frac{n}{n'}h$로 된다.

문 제

1. 다음의 [ ]안에 알맞는것을 써넣어라.
빛이 공기속에서 다른 매질과의 경계면을 경사지어 비칠 때 빛선과 경계면사이각은 30°이고 반사빛선은 굴절빛선과 수직이다. 이때 입사각과 굴절각은 각각 [ ]이다.
ㄱ) 30°, 60°　ㄴ) 60°, 60°
ㄷ) 60°, 30°　ㄹ) 30°, 30°

그림 1-4

2. 빛이 공기로부터 속이 비여있지 않은 유리구를 지난다. 그림 1-4에 표시한 빛경로중에서 정확한것을 밝혀라.
ㄱ) OPA　ㄴ) OPB　ㄷ) OQC　ㄹ) OQD

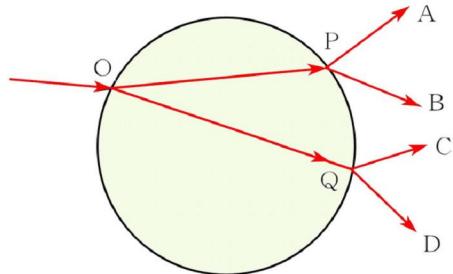
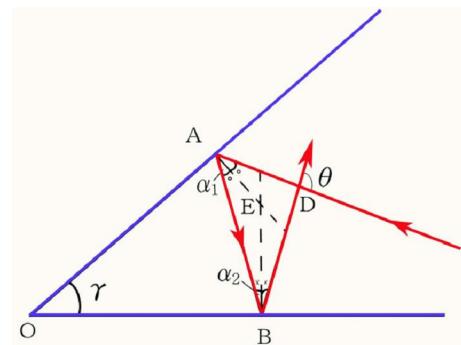
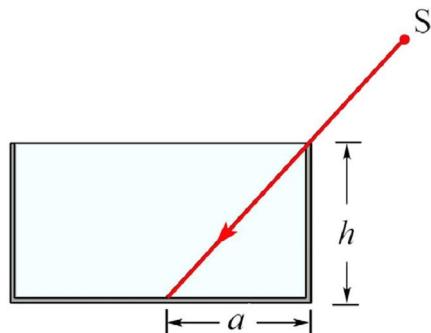
그림 1-5

3. 서로 γ의 각을 이루고있는 두 거울면에 빛이 입사할 때 반사빛선과 입사빛선사이각을 구하여라.(그림 1-5)

4. 공기속에 있는 평행평면투명체를 지난 빛선은 처음 입사하는 빛선에 평행이라는것을 증명하여라. 굴절빛선이 엇나가는 정도는 얼마이며 이것을 어디에 적용할수 있는가?

5. 바닥의 깊이가 h인 빈 그릇을 전등이 비치는 곳에 수평으로 놓고 바닥에 생긴 그릇벽의 그림자의 길이 a를 재였다.(그림 1-6)
그릇에 물을 가득 채웠을 때 그림자의 길이는 어떻게 변하겠는가? 이때의 그림자의 길이가 b라면 물의 굴절률은 어떻게 표시되겠는가?

그림 1-6

6. 벽에 걸려져있는 평면거울앞으로 사람이 다가갈 때 영상은 어느쪽으로 어떤 속도로 이동하는가? 이때 사람은 자기의 영상의 크기를 어떻게 보겠는가? 왜 그런가?

제 2 절. 구면거울의 공식

구면거울의 공식

우리들의 일상생활과 과학기술분야에서는 구면거울을 많이 쓴다.

구면의 일부를 반사면으로 한 거울이 구면거울이다.

빛의 반사가 구면의 안쪽 면(오목면)에서 일어나는 거울이 오목거울이며 구면의 바깥쪽 면(볼록면)에서 일어나는 거울이 볼록거울이다.

구면거울의 중심(극)과 구면의 중심을 지나는 직선을 **빛축(주빛축)**이라고 부르며 빛축근방을 지나는 빛선을 **근축빛선**이라고 부른다. 다시말하여 근축빛선은 빛축과 매우 작은 각을 짓는 빛선 또는 빛축가까이에서 빛축에 평행으로 들어오는 빛선을 의미한다.

※ 앞으로 근축빛선에 대해서만 살펴본다.

근축빛선은 $\sin\alpha \approx \alpha$ [rad]이 성립되는 각을 짓는 빛선을 말한다.

빛축에 평행으로 구면거울에 입사한 빛들은 반사된 후 오목거울에서는 빛축과 한 점에서 사귀며 볼록거울에서는 반사빛선들의 연장선이 빛축과 한 점에서 사귄다.

이러한 점이 초점이며 초점을 지나면서 빛축에 수직인 면을 **초점면**이라고 부른다.

오목거울의 초점은 실초점이며 볼록거울의 초점은 허초점이다.

구면거울의 중심에서 초점까지의 거리가 초점거리(f)이다.

구면거울에서 구면거울로부터 물체까지의 거리 a, 영상까지의 거리 b, 구면의 반경 R사이에 어떤 관계가 성립하겠는가.

오목거울의 빛축우의 점 S에 놓인 점광원에서 나오는 임의의 근축빛선 SM은 거울에서 반사되여 S′점에서 빛축과 사귄다. 그러므로 S′는 S의 영상점이다.(그림 1-7)

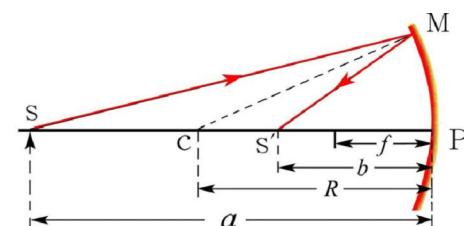



그림 1-7. 구면거울의 공식 알아내기

이때 빛의 반사법칙에 의하여 $\angle SMC = \angle CMS'$이므로 MC는 $\Delta SMS'$에서 $\angle SMS'$의 2등분선이다.

그러므로 3각형의 내각의 2등분선의 성질에 의하여 $\dfrac{SM}{S'M} = \dfrac{SC}{CS'}$

한편 SM, S′M은 근축빛선들이므로 $SM \approx SP = a$, $S'M \approx S'P = b$이고 $SC = SP - PC = a - R$, $CS' = CP - S'P = R - b$이다.

그러므로 웃식은 $\dfrac{a}{b} = \dfrac{a-R}{R-b}$로 쓸수 있다.

이 식을 정리하면 다음과 같은 결과식을 얻는다.

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R} \quad \text{반경으로 표시한 구면거울공식} \qquad (1)$$

구면거울의 빛축에 평행으로 빛이 입사하는 경우 물체까지의 거리 $a = \infty$이므로

$\frac{1}{a}=0$이다. 그러므로 식 1에서 $b=\frac{R}{2}$이다.

빛축에 평행으로 입사한 빛들은 빛축과 초점에서 사귀므로 이때 $b=f$이다.

따라서 구면거울의 초점거리는 $f=\frac{R}{2}$이다.

구면거울의 초점거리로 구면거울의 공식을 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f} \qquad \text{초점거리로 표시한 구면거울공식} \tag{2}$$

식 1과 2는 오목거울이나 볼록거울에서 다 성립된다.

이때 R, f의 부호는 오목거울에서 +, 볼록거울에서 −이다.

※ 구면거울에서 거울앞에 놓이는 실영상까지의 거리와 실초점거리는 +값을 가지며 거울뒤에 놓이는 허영상까지의 거리와 허초점거리는 −값을 가진다.

구면거울에 의한 영상의 배률

우리는 오목거울앞에 물체를 놓았을 때 커지거나 작아지며 또 거꾸로 서거나 바로선 영상을 보게 된다.

거울에 의하여 물체의 영상을 얻자면 우선 물체의 한 점에서 나오는 두개이상의 빛선들이 거울에서 반사된 후 사귀는 점 즉 영상점을 얻어야 한다.

※ 반사빛선들이 흩어질 때에는 그것들의 연장선을 그어 사귀는 점 즉 허영상점을 얻으면 된다.

참고 구면거울의 부빛축과 초점

구면거울에서 구면의 중심 C를 지나 입사하여 거울(거울의 중심은 제외)에서 반사된 후 되돌아 나가는 빛선들을 구면거울의 **부빛축**이라고 부른다. 구면거울에서 부빛축은 무수히 많이 그릴수 있다.

한편 부빛축에 평행으로 입사한 빛들은 반사된 후 부빛축과 한 점 F′에서 사귄다.(그림 1-8) 이러한 점을 **부초점**이라고 부른다.

부빛축이 여러개이므로 부초점도 여러개이다.

그림 1-8. 구면거울의 주초점과 부초점

구면거울에서 빛축(주빛축)에 평행으로 입사한 빛들이 반사되여 빛축과 사귀는 점이 초점(주초점) F이므로 초점은 부초점들중에서 빛축(주빛축)우에 놓이는 점이다. 이러한 초점(주초점, 부초점)들이 놓이는 면이 초점면이다.

구면거울에서 영상을 그릴 때에는 물체에서 나와 반사된 후 빛선이 지나는 길을 쉽게 그릴수 있는 다음과 같은 4개의 빛선을 리용한다.(그림 1-9, 1-10)

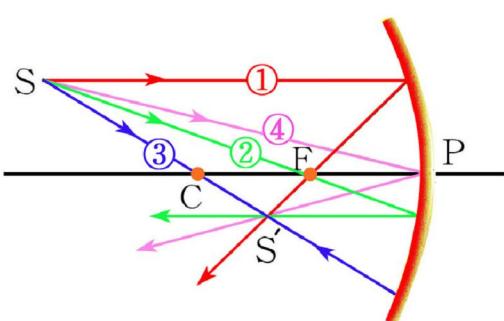



그림 1-9. 오목거울에서 영상그리기에 쓰는 빛선들

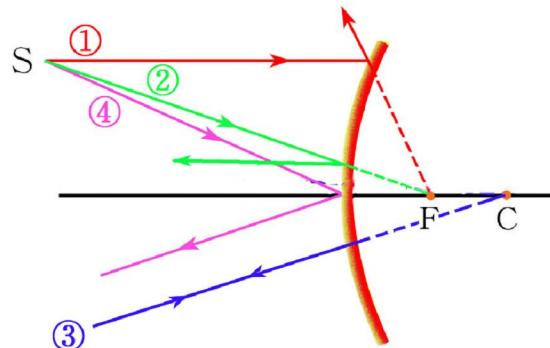



그림 1-10. 볼록거울에서 영상그리기에 쓰는 빛선들

그림 1-11에 구면거울에서 생기는 영상을 그리는 실례를 주었다.

구면거울에서 생기는 영상까지의 거리는 $b=\dfrac{af}{a-f}$ 이므로 실영상까지의 거리는 +값을 가지며 허영상까지의 거리는 −값을 가진다.

볼록거울에서는 언제나 $b<0$이므로 실영상은 생기지 않고 허영상만 생긴다.

※ 구면거울에서 생기는 실영상은 아래와 우, 왼쪽과 오른쪽이 다 바뀐다.

허영상인 경우에는 물체와 대비할 때 왼쪽과 오른쪽이 바뀐다.

실영상은 비춤판에 받아볼수 있지만 허영상은 비춤판에 받아보지 못하고 눈으로만 볼수 있다.

그림 1-11. 구면거울에서 영상 그리기 실례

ㄱ) $f<a<2f$인 때 오목거울에서 생기는 확대된 실영상

ㄴ) $a<f$인 때 오목거울에서 생기는 확대된 허영상

ㄷ) 볼록거울에서 생기는 축소된 허영상

구면거울에서 생기는 영상의 크기는 물체의 크기보다 커질수도 있고 작아질수도 있다. 이것을 표시하기 위하여 배률(선배률)을 정한다.

보통 구면거울에서 생긴 영상의 크기가 물체의 크기의 몇배인가를 표시하는 물리적량(N)을 **배률**이라고 부른다.

$$N=\frac{h'}{h}=\frac{b}{a}=\frac{b-f}{f} \qquad \text{배 률}$$

실영상인 때 $b>0$이므로 $N>0$이며 허영상인 때에는 $b<0$이므로 $N<0$이다.

그리고 확대된 영상인 경우에는 $|b|>a$ 이므로 $|N|>1$ 이며 축소된 영상인 경우에는 $|N|<1$이다.

구면거울은 광학기구들에서 렌즈를 대신하여 쓰기도 한다.(반사망원경)

또한 빛을 한 점에 모아 센 빛을 얻는데 쓰기도 하며(태양열가마) 센 평행빛을 얻는데 리용하기도 한다.(탐조등, 환등기 등)

구면거울에서 물체까지의 거리에 따르는 영상은 어떻게 되는가?

[**례제**] 그림 1-12에서 M_1과 M_2은 초점거리가 같은 오목거울이며 빛축을 일치시켜놓았다. 빛축에 평행인 빛선 AB가 두 오목거울사이에서 되돌이반사(반사빛이 처음상태와 같아지는 반사)를 일으키자면 두 거울의 중심 P_1과 P_2이 얼마만큼 떨어져있어야 하는가?

초점 F_1와 F_2의 자리를 그림에 표시하고 빛선 AB가 두 오목거울에서 반사되는 빛경로를 그리여라.(두가지이상의 방법으로 그리여라.)

그림 1-12

풀이. **첫째 방법.** 두 거울의 초점을 일치시켜놓으면 된다.

따라서 $P_1P_2=2f$이다.(그림 1-13의 ㄱ)

둘째 방법. 두 거울의 초점들사이거리를 초점거리만큼 떨어져놓으면 된다.

따라서 $P_1P_2=3f$이다.(그림 1-13의 ㄴ)

ㄱ) ㄴ)

그림 1-13

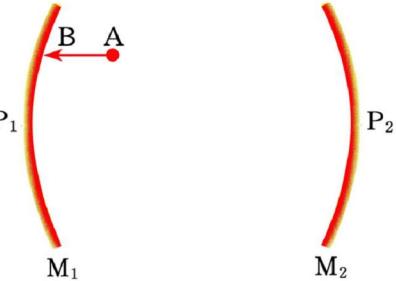
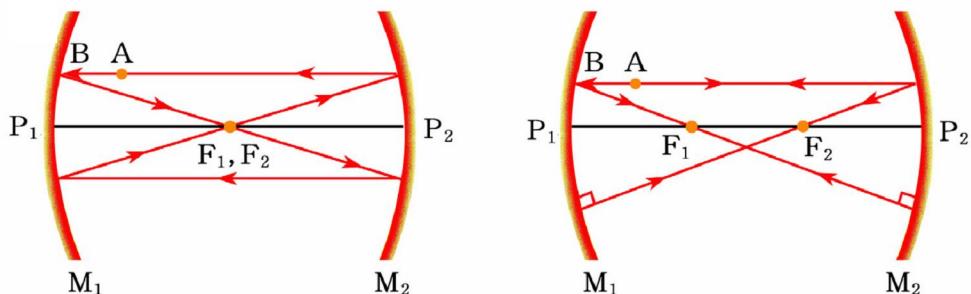
문 제

1. 물체를 오목거울앞에 놓았더니 오목거울앞에 세운 비춤판에 확대된 영상이 생겼다. 만일 거울로부터 물체까지의 거리를 절반으로 줄이고 비춤판을 이동시킨다면 비춤판에는 어떤 영상이 생기겠는가를 아래에서 찾아보아라.
   ㄱ) 영상이 생기지 않는다.
   ㄴ) 바로서고 확대된 영상이 얻어진다.
   ㄷ) 거꾸로서고 축소된 영상이 얻어진다.
   ㄹ) 거꾸로서고 확대된 영상이 생긴다.
2. 구면거울에서 허영상이 맺히는 자리에 필림을 놓고 사진을 찍어 영상을 얻을수 있는가?
3. 초점거리가 30cm인 볼록거울 또는 오목거울로 물체의 1/2만 한 크기의 영상을 얻자면 물체를 거울로부터 얼마만한 거리에 놓아야 하겠는가?
4. 초점거리가 20cm인 오목구면거울의 빛축에 수직되게 높이가 10cm인 물체가 거울앞 60cm 거리에 놓여있다. 영상까지의 거리와 영상의 배률, 영상의 크기를 구하여라.(그림 1-14)
   실제거리를 1/10로 축소하여 영상을 그리고 계산한 값과 비교하여라.

그림 1-14

5. 벽으로부터 1m 떨어진 곳에 초불이 있다. 길이가 11배 되는 실영상을 오목거울로 벽에 만들자면 반경이 얼마인 거울을 어디에 놓아야 하겠는가?

6. 그림 1-15에서 직선 AB는 구면거울의 빛축, S는 광원, S′는 그의 실영상이다. 거울의 자리와 초점을 그리기방법으로 찾아보아라.

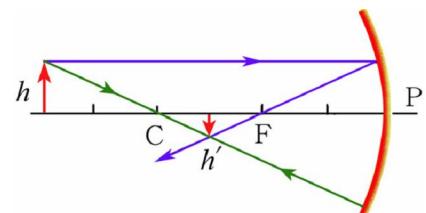
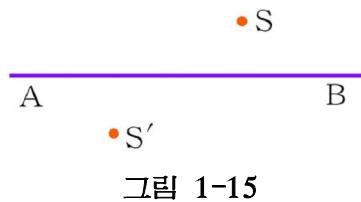



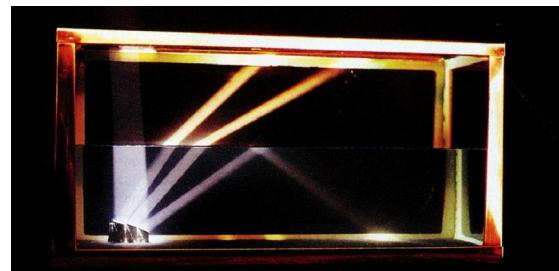
그림 1-15

제 3 절. 전반사와 프리즘

전 반 사

빛이 물속으로부터 공기중으로 나갈 때 흥미있는 현상이 일어난다.(그림 1-16)

그림 1-16. 전반사

빛이 광학적으로 밴 매질로부터 성긴 매질로 입사할 때 입사각을 점점 크게 하면 그에 따라 굴절각도 커지면서 입사각이 90°에 이르기 전에 굴절각이 먼저 90°에 이른다.

굴절각이 90°에 이른 다음 입사각을 더 크게 하면 어떤 현상이 나타나겠는가.

○ 그림 1-17의 ㄱ와 같이 반원형유리판의 반경을 따라 유리와 공기의 경계면에 빛을 입사시키면 일부는 반사되고 일부는 굴절된다.

○ 입사각을 변화시키면서 반사각, 굴절각의 변화와 반사빛선과 굴절빛선의 세기를 따져본다. 입사각을 점차 크게 하면 굴절각이 커지면서 굴절빛선은 법선에서 멀어지며 굴절빛선의 세기는 약해지고 반사빛선은 더 세진다.(그림 1-17의 ㄴ)

○ 굴절각이 90°에 이른 다음 입사각을 좀 더 크게 하면 굴절빛선은 완전히 없어지고 입사된 빛은 모두 반사된다.(그림 1-17의 ㄷ)

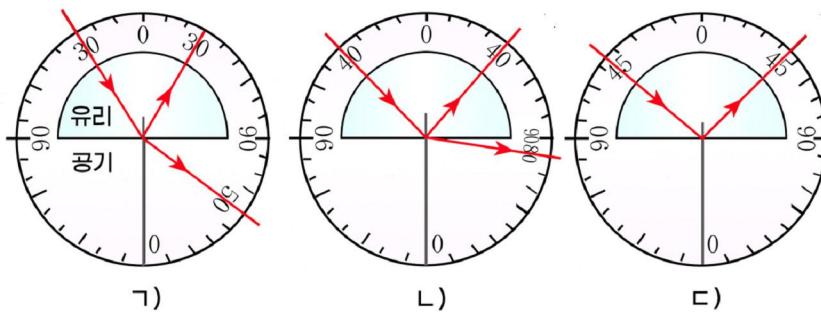



그림 1-17. 전반사를 알아보는 실험

이와 같이 빛이 광학적으로 밴 매질로부터 성긴 매질로 입사할 때 굴절각이 90°로 될 때의 입사각을 **림계각**($\alpha_{림}$)이라고 부른다.(그림 1-18)

그리고 광학적으로 밴 매질에서 성긴 매질로 빛이 림계각보다 더 큰 입사각으로 입사할 때 경계면에서 모두 반사되는 현상을 **전반사**라고 부른다.

굴절률이 n_2인 매질로부터 굴절률이 $n_1(n_2 > n_1)$인 매질로 빛이 입사할 때 림계각 $\alpha_{림}$의 크기를 구하자.

굴절법칙 $\dfrac{\sin\alpha_{림}}{\sin 90°} = \dfrac{n_1}{n_2}$로부터 다음과 같다.

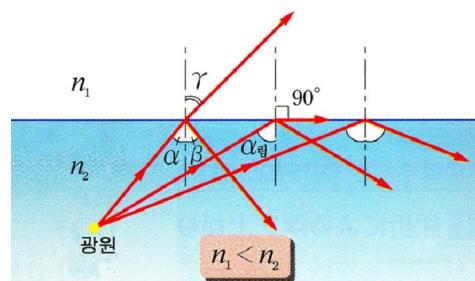



그림 1-18. 전반사때 림계각

$$\sin\alpha_{림} = \frac{n_1}{n_2} \quad \text{림 계 각} \qquad (1)$$

만일 성긴 매질이 진공(또는 공기)이라면 림계각은 다음과 같다.

$$\sin \alpha_{림} = \frac{1}{n} \qquad (2)$$

그림 1-19. 전반사프리즘

※ 식 1에서 $\frac{n_1}{n_2}$는 밴 매질에 대한 성긴 매질의 상대굴절률이다.

물로부터 공기로, 유리로부터 공기로 빛이 입사할 때 림계각은 얼마나 되겠는가?

전반사현상은 빛의 전파방향을 바꾸는데 리용된다.

유리의 림계각은 42°보다 작으므로 유리와 공기의 경계면에 45°의 입사각으로 빛이 입사되면 전반사가 일어난다. 이것을 리용하여 빛의 전파방향을 변화시키는 광학요소가 **전반사프리즘**이다.(그림 1-19)

빛의 전파방향을 90° 바꾸는 전반사프리즘은 잠망경(그림 1-20), 교육용투영기, 쌍안경 등에 리용한다.

그림 1-20. 잠망경에서 전반사의 리용

전반사현상은 빛섬유에 중요하게 리용된다.

굴절률이 큰 석영유리나 투명수지로 된 가는 속줄걸면에 굴절률이 보다 작은 물질을 입힌것을 **빛섬유**라고 부른다.

빛섬유는 빛의 전반사현상을 리용하여 빛에네르기손실을 매우 적게 하면서 빛을 전파시키는 가는 줄이다.(그림 1-21)

그림 1-21. 빛섬유원리

실지로 쓰이는 빛섬유의 직경은 수~수십 μm정도이다.

빛섬유는 통신분야에 널리 쓰이고있다. 특히 빛섬유를 리용하여 서로 상대방의 얼굴을 보면서 대화하는 전화도 나오고있다. 빛섬유로는 사진이나 그림 같은것을 다른 곳으로 보낼수 있으며 유선TV방송도 할수 있다.

의학분야에서 빛섬유묶음으로 사람의 내장을 들여다보는 내시경(그림 1-22)을 만들어 쓴다.

이밖에도 빛섬유는 장식, 조명, 감시, 소재의 가공 등 여러 분야에 리용되고있으며 그 리용분야가 더 커지고있다.

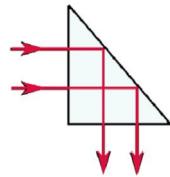
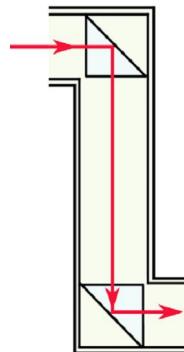
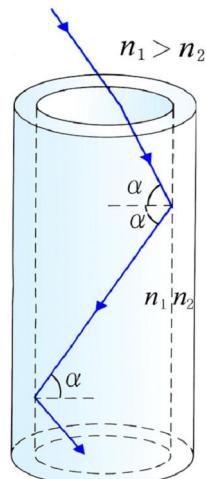
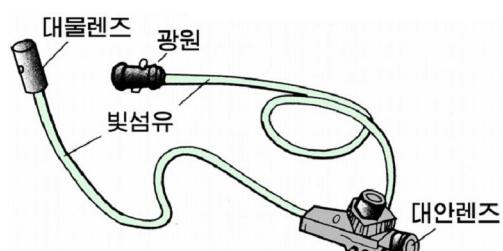



그림 1-22. 내시경

프리즘에서의 빛의 굴절

굴절률이 n인 유리로 정각 φ를 작게 만든 3각프리즘이 공기속에 있을 때 그의 한쪽 옆면에 작은 입사각으로 입사한 빛이 프리즘에서 얼마나 기울어지는가를 따져보자.(그림 1-23)

그림 1-23. 프리즘에서 빛의 굴절

정각 φ와 입사각 α_1가 작으므로 굴절각 γ_1, 다른쪽 옆면에서 입사각 α_2, 굴절각 γ_2도 작다.

※ 이 각들의 시누스값은 각의 라디안값과 거의 같다.

그러므로 M점과 N점에서 굴절법칙

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\gamma_1}=n,\quad \frac{\sin\alpha_2}{\sin\gamma_2}=\frac{1}{n}$$

을 근사적으로 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\alpha_1 \approx n\gamma_1,\qquad n\alpha_2 \approx \gamma_2$$

프리즘에서 굴절빛선이 얼마나 편기되였는가를 나타내는 각을 **편각**(δ)이라고 부른다.

△MNF에서 각들사이의 관계를 찾고 웃식을 고려하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\delta=\angle FMN+\angle FNM=(\alpha_1-\gamma_1)+(\gamma_2-\alpha_2)=(n-1)(\gamma_1+\alpha_2)$$

한편 4각형 AMEN과 3각형 MEN에서 각들사이의 관계를 따지면 다음과 같다.

$$\gamma_1+\alpha_2=\varphi$$

따라서

$$\delta = (n-1)\varphi \qquad \text{프리즘에서의 편각} \qquad (3)$$

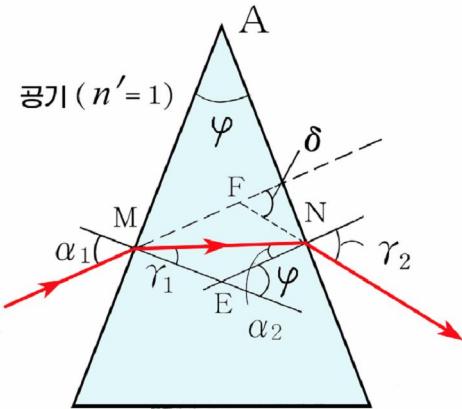
식 3에서 알수 있는것처럼 정각 φ가 작은 프리즘에 작은 입사각으로 입사한 빛선이 프리즘을 지나면서 기울어지는 편각 δ는 입사각에 관계없고 정각 φ에 비례한다. 즉 φ가 클수록 더 많이 기울어진다.

φ=0인 때 δ는 얼마인가? 이러한것의 실례는 무엇인가?

[**례제**] 빛이 매질 A로부터 B로 들어갈 때 입사각이 45°이고 굴절각이 30°이다. 빛이 매질 B로부터 A로 나갈 때 림계각은 얼마인가?

풀이. 주어진것: α=45°

γ=30°

구하는것: $\alpha_{림}$?

매질 A와 B의 굴절률을 n_1, n_2이라고 하자.

빛이 매질 A에서 매질 B로 들어갈 때 굴절법칙을 쓰면

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{n_2}{n_1}=\frac{\sin 45°}{\sin 30°}=\sqrt{2}$$

빛이 매질 B에서 매질 A로 들어갈 때에는 굴절각이 90°이다. 즉 이때에는 입사각이 림계각이다.

$$\sin\alpha_{림}=\frac{n_1}{n_2}=\frac{1}{\sqrt{2}}$$

답. $\alpha_{림}$=45°

문 제

1. 빈 시험관을 경사지게 물속에 잠그고 우에서 내려다보면 관이 거울면처럼 보인다. 실지 실험을 하여보고 그 리유를 알아내여라.
2. 물속에 들어가 우를 쳐다보면 하늘이 동그랗게 보인다. 왜 그런가? 물속에서 하늘이 쳐다보이는 각의 범위는 얼마인가?
3. 그림 1-24에서 관 A에 물이 흐르지 않을 때에는 광원 S에서 나오는 평행빛선이 관 A를 지나 비춤판 B까지 비춘다. 그러나 관에서 물이 흘러나올 때에는 A에서 B로 가는 빛선은 없어지고 물이 떨어지는 곳 C가 밝아진다. 왜 그런가? 이런것을 어디에 리용하는가?

그림 1-24

4. 그림 1-25는 빛이 공기에서 물로 전파될 때 굴절현상을 보여준다. 그림으로부터 무엇을 알수 있는가? 아래의 답가운데서 옳은 답을 찾아보아라.

ㄱ) MN은 경계면이다.

ㄴ) PQ의 왼쪽은 물이다.

ㄷ) 굴절각은 60° 이다.

ㄹ) MN의 아래쪽은 공기이다.

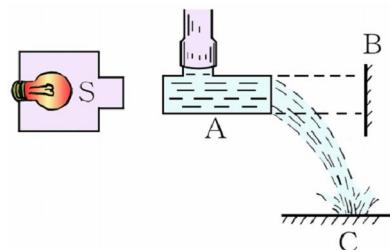
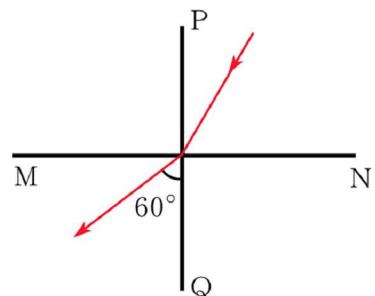



그림 1-25

제 4 절. 렌즈의 공식

렌 즈

빛의 굴절에 의하여 빛묶음을 모으거나 헤쳐지게 하여 물체의 영상을 만드는 투명체를 **렌즈**라고 부른다.

렌즈의 두께가 구면의 반경에 비하여 충분히 작은 렌즈를 **얇은 렌즈**라고 부른다. 얇은 렌즈에서 렌즈의 중심을 지나는 빛선은 곧추 나간다.

렌즈는 작은 프리즘들의 모임으로 볼수 있다.(그림 1-26)

렌즈를 이루는 프리즘들의 정각은 렌즈의 중심에서 변두리로 가면서 점점 더 커진다. 그러므로 렌즈에 빛이 입사할 때 중심으로부터 변두리로 가면서 빛이 더 심하게 굴절된다.

만일 렌즈에 넓은 평행빛묶음을 입사시키면 렌즈에서 굴절된 후 한 점에 모이지 못한다.(그림 1-27)

그러므로 빛축근방을 지나는 근축빛선에 대해서만 관찰한다. 빛축에 평행으로 입사된 빛선들은 렌즈를 지난 다음 초점에서 사귀거나 그것들의 연장선이 초점에서 사귄다.(그림 1-28)

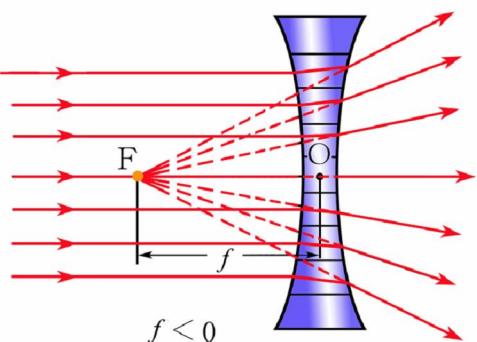
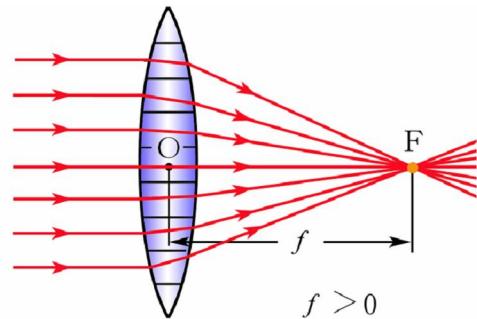



그림 1-26. 프리즘의 모임으로서의 얇은 렌즈

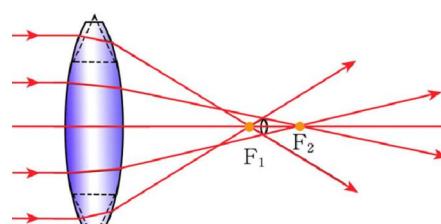



그림 1-27. 넓은 빛묶음이 입사할 때 렌즈에서 빛의 굴절

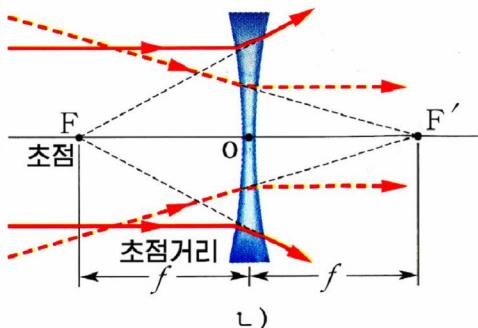
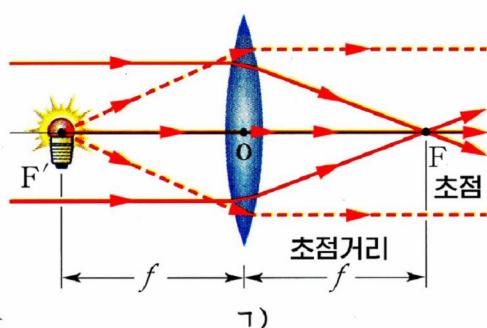



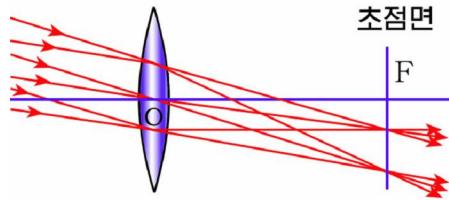
그림 1-28. 초점과 초점거리

볼록렌즈의 초점거리는 +, 오목렌즈의 초점거리는 −부호를 붙여 표시한다.

빛축에 경사지은 평행빛묶음이 입사한 빛선들이 렌즈를 지난 다음 사귀는 점(부초점)들이 놓이는 초점 F를 포함하는 면을 **초점면**이라고 부른다.(그림 1-29)

그림 1-29. 렌즈의 초점면

렌즈가 빛을 얼마나 세게 굴절시키는가를 특징짓기 위해 렌즈의 세기를 정한다.

렌즈의 초점거리 f의 거꿀수와 같은 물리적량을 **렌즈의 세기**(A)라고 부른다.

$$A=\frac{1}{f}$$ 렌즈의 세기

렌즈의 세기단위는 1D(**디오프트리**)이다. 1D는 초점거리가 1m인 렌즈의 세기와 같은 량이다.

초점거리가 짧을수록 즉 렌즈의 세기가 클수록 렌즈에서 빛은 더 세게 굴절된다. 볼록렌즈의 세기는 +, 오목렌즈의 세기는 −값을 가진다.

렌즈의 공식

렌즈로부터 물체까지의 거리를 a, 영상까지의 거리를 b, 초점거리를 f라고 할 때 이 량들사이에 어떤 관계가 있는가를 따져보자.(그림 1-30)

그림 1-30. 렌즈의 공식유도

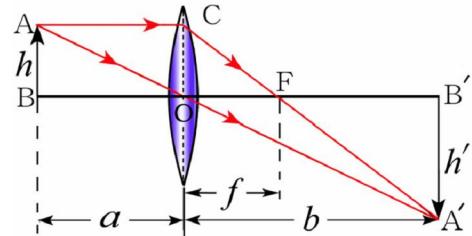
초점거리가 f인 볼록렌즈에서 물체 AB의 영상이 A′B′이다.

그림에서 △COF ∽ △A′B′F이므로

$\frac{b-f}{f}=\frac{\mathrm{A'B'}}{\mathrm{CO}}$이고 △ABO ∽ △A′B′O이므로 $\frac{b}{a}=\frac{\mathrm{A'B'}}{\mathrm{AB}}$이다.

여기서 CO = AB이고 우의 두 식의 오른변이 같아서 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{b}{a}=\frac{b-f}{f}=\frac{b}{f}-1$$

이 식의 량변을 b로 나누고 정리하면 **렌즈의 공식**을 얻는다.

$$\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$$ 렌즈의 공식

※ 이 공식은 얇은 렌즈에서만 성립된다.

렌즈에서 영상의 크기가 물체의 크기의 몇배인가를 표시하는 량을 **영상의 배률**이라고 부른다.

$$N=\frac{h'}{h}=\frac{b}{a}=\frac{b-f}{f}$$ 영상의 배률

영상의 배률은 실영상인 때 $b>0$, 허영상인 때 $b<0$이므로 실영상의 배률은 +, 허영상의 배률은 —값을 가진다.

영상의 배률의 절대값이 $|N|>1$이면 영상은 확대된 영상이며 $|N|<1$이면 축소된 영상이다.

렌즈에서 영상

렌즈에서 영상을 얻으려면 물체의 한 점에서 나오는 두개이상의 빛선이 렌즈를 지난 다음 사귀는 영상점을 구하여야 한다.

이를 간단히 그리기 위하여 3개의 특징적인 빛선을 리용한다.(그림 1-31)

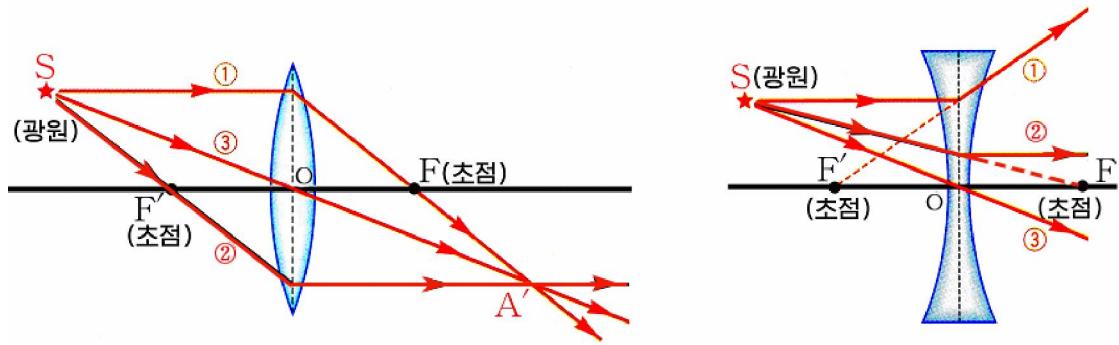



그림 1-31. 렌즈에서 영상그리기에 쓰는 빛선들

렌즈에서 물체의 영상이 어떻게 생기는가를 알아보자.

볼록렌즈에서는 물체까지 거리 a와 초점거리 f가 정(+)의 값을 가진다.

그러므로 $a>f$인 경우에는 영상까지 거리 b는 정(+)의 값을 가지며 실영상이 생긴다.(그림 1-32의 ㄱ)

$a<f$인 경우 즉 물체가 초점거리보다 더 가깝게 있을 때에는 b가 부(—)의 값을 가지므로 허영상이다.(그림 1-32의 ㄴ)

ㄱ) ㄴ)

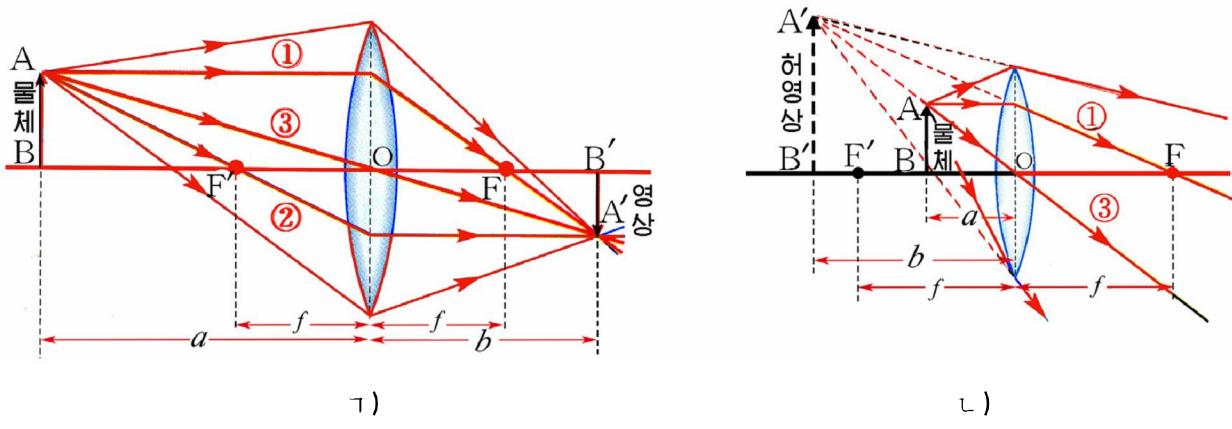



그림 1-32. 볼록렌즈에 의한 물체의 영상

물체의 허영상은 렌즈를 지난 빛들의 연장선이 사귀면서 만드는 영상이므로 비

춤판에 받아볼수 없으며 다만 렌즈를 통해서만 볼 수 있다.

오목렌즈에서는 언제나 축소된 허영상이 생긴다.(그림 1-33)

그림 1-33. 오목렌즈에 의한 물체의 허영상

[례제] 검은 함안에 두개의 렌즈가 빛축이 일치되여 놓여있다.

검은 함밖에서 빛축에 평행인 빛묶음을 입사시켰더니 두 렌즈를 지난 후에도 빛축에 평행으로 나간다. 그러나 빛묶음의 너비는 변한다.

검은 함속에 어떤 종류의 렌즈들이 어떻게 놓여있겠는가? (그림 1-34)

그림 1-34

풀이. 두가지 방법이 있다.

첫째 방법. 두 볼록렌즈의 초점 즉 첫 렌즈의 뒤초점과 둘째 렌즈의 앞초점이 일치되여있는 때이다.

빛묶음의 너비(폭)가 넓어지려면 $f_1 < f_2$ 이여야 한다.(그림 1-35의 ㄱ)

두 렌즈사이거리는 $d = f_1 + f_2$, 영상은 거꾸로 선다.

둘째 방법. 오목렌즈와 볼록렌즈의 초점을 일치되게 하면서 오목렌즈를 앞에 놓을 때이다. 이때 $|f_1| < f_2$ 이 되여야 한다.(그림 1-35의 ㄴ)

두 렌즈사이거리는 $d = f_2 - f_1$, 영상은 바로 선다.

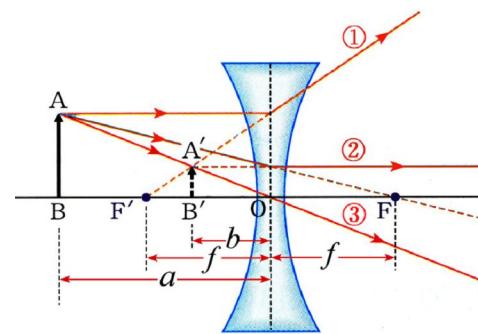
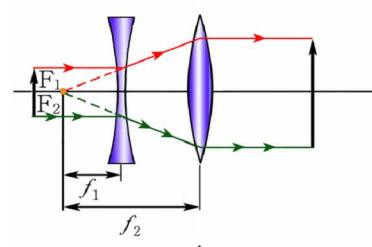
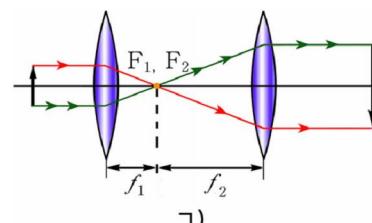



그림 1-35

문 제

1. 다음 문장에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 설명하여라.

   ㄱ) 볼록렌즈는 빛을 모아주므로 볼록렌즈를 지난 빛은 한 점에서 사귄다.

   ㄴ) 오목렌즈는 빛을 흩어지게 하므로 오목렌즈를 지난 빛은 한 점에서 사귈수 없다.

   ㄷ) 오목렌즈가 만드는 허영상은 물체가 렌즈에 가까와질 때 더 커진다.

   ㄹ) 볼록렌즈가 만드는 허영상은 물체가 렌즈에 가까와질 때 더 커진다.

2. 물체가 볼록렌즈를 거쳐 비춤판에 확대된 영상을 만든다. 만일 렌즈로부터 물체까지의 거리를 절반으로 줄이면 비춤판에는 어떤 영상이 생기겠는가? 아래의 대답들에서 찾아보아라.

   ㄱ) 영상이 생기지 않는다.

ㄴ) 바로선 확대된 영상이 얻어진다.

ㄷ) 거꾸로 서고 축소된 영상이 얻어진다.

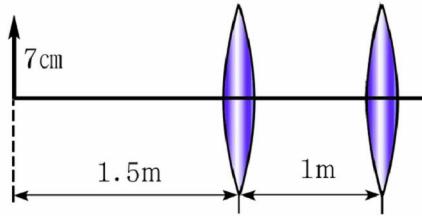
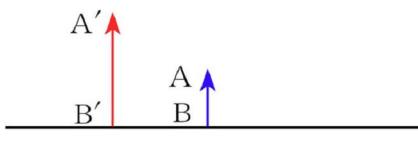
ㄹ) 거꾸로 서고 확대된 영상이 얻어진다.

3. 세기가 +2D인 렌즈 두개가 공통빛축을 가지고 1m 떨어져있다.(그림 1-36)
첫 렌즈로부터 1.5m 앞에 높이가 7cm인 물체가 빛축에 수직으로 서있을 때 이 렌즈계에 의한 영상은 어디에 어떤 높이로 생기겠는가?

그림 1-36

4. 그림 1-37에서 AB는 물체이고 A′B′는 그의 영상이다. 기하학적그리기방법으로 렌즈의 중심과 초점의 자리를 구하여라. 어떤 렌즈인가도 밝혀라.

그림 1-37

5. 광학적세기가 A_1, A_2 인 두개의 얇은 렌즈를 겹쳐놓으면 렌즈계의 광학적세기 A는 $A = A_1 + A_2$ (즉 $\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$)임을 증명하여라.

제5절. 확 대 경

같은 물체라고 하여도 가까이에 있는 물체는 크게 보이고 먼곳에 있는 물체는 작게 보인다. 왜 이렇게 보이겠는가?

분 해 능

사람의 눈은 하나의 광학계를 이룬다. 물체로부터 오는 빛이 동공을 거쳐 들어오면 눈의 광학계에 의하여 망막에 물체의 영상이 맺힌다. 망막에 떨어진 빛은 망막에 분포되여있는 빛수감요소들을 자극시켜 신호를 발생시키며 이것이 시신경을 따라 뇌수에 전달되고 분석된다.

물체의 밝기에 따라 영상의 밝기가 다르며 이에 따라 빛수감요소에 주는 자극도 다르므로 물체의 밝기가 판단된다. 한편 빛은 빛수감요소들에 색자극도 준다. 그리하여 물체의 밝기와 색분포를 감각하여 물체를 보게 된다.

❓ 물체의 크기는 어떻게 느끼는가.

눈에 보이는 물체의 크기는 망막우에 생기는 영상의 크기에 관계된다.

즉 망막우에 생기는 영상의 크기가 클수록 큰 물체로 느낀다.

이 영상의 크기는 물체를 바라보는 각에 관계된다.

물체의 두 끝점에서 눈의 중심으로 들어오는 빛선들사이의 각이 시각이다.

시각이 커야 망막우에 형성되는 영상이 커진다. 망막우에 생긴 영상이 클수록 자극을 받는 빛수감요소가 많아져서 물체를 똑똑히 가려볼수 있다.

그림 1-38. 가까이에 있는 물체일수록 시각이 크다

물체가 클수록 그리고 가까이 있는 물체일수록 잘 보이는것은 시각이 크기때문이다.(그림 1-38)

시각이 1′보다 작으면 망막에 맺히는 영상이 한개의 빛수감요소보다 작아서 물체는 점으로 보이며 물체의 부분들은 전혀 보이지 않는다.

물체를 이루는 점들을 갈라보려면 시각이 1′보다 커야 한다.

서로 가까이에 있는 두 점을 갈라볼수 있는 최소시각을 눈의 **분해능**이라고 부른다. 정상적인 사람의 눈의 분해능은 약 1′정도이다.

확 대 경

대단히 작은 물체나 물체의 부분들을 똑똑히 보려면 물체를 가까이에서 보아야 한다. 그런데 사람의 눈은 가까이 보는데서 제한이 있고 눈도 인차 피로해진다.

그러므로 물체를 자세히 볼 때에는 잘보임거리(정상눈에 대하여 25cm정도)에서 보게 된다. 작은 물체를 똑똑히 보기 위하여서는 광학기구를 사용하여 시각을 크게 하여야 한다. 이러한 광학기구들중에서 제일 간단한것이 확대경이다. 볼록렌즈의 초점거리안에 물체를 놓고 렌즈를 통하여 그 물체를 보면 확대되여 보인다.

이와 같이 물체를 확대하여 보기 위하여 쓰는 초점거리가 짧은 볼록렌즈를 **확대경**이라고 부른다.

확대경으로 물체를 똑똑히 보려면 물체의 영상이 잘보임거리(25cm)에 생기도록 하여야 한다.

이렇게 하면 보려는 물체가 근점보다 가까이 있지만 물체의 확대된 허영상이 잘보임거리에 생기므로 시각이 커져 잘 볼수 있다.

광학기구로 물체의 영상을 얼마나 크게 확대할수 있는가를 배률로 표시한다.

광학기구로 물체의 영상을 보는 시각 α'와 눈으로 물체를 보는 시각 α와의 비를 **광학기구의 배률(각배률)**이라고 부른다.

$$N = \frac{\alpha'}{\alpha}$$ **광학기구의 배률**

확대경의 배률은 어떻게 되겠는가.

그림 1-39에서와 같이 눈을 확대경의 초점 F에 놓았다고 하자.

허영상 h'와 눈사이거리가 잘보임거리 D와 같으므로 확대경으로 물체의 영상 h'를 보는 시각 α'와 초점거리 f, 물체의 크기 h사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\alpha' \approx \frac{h}{f} = \frac{h'}{D}$$

그림 1-39. 확대경의 원리

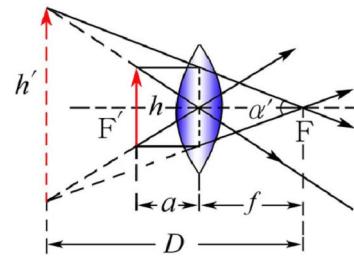
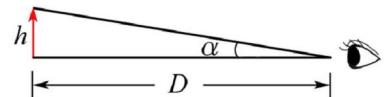
한편 물체를 직접 눈으로 보는 시각 α와 잘보임거리 D, 물체의 크기 h사이에는 다음과 같은 관계가 있다. (그림 1-40)

그림 1-40. 물체를 눈으로 직접 보는 시각

$$\alpha \approx \frac{h}{D}$$

그러므로 확대경의 배률은 다음과 같다.

$$N = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{h/f}{h/D} = \frac{D}{f}$$

$$N = \frac{D}{f}$$ **확대경의 배률**

※ 우의 배률공식은 눈을 확대경의 초점에 놓을 때에 성립하는 식이다.

확대경의 배률은 렌즈의 초점거리에 거꿀비례한다. 즉 렌즈의 광학적세기가 클수록 확대경의 배률은 크다.

확대경의 배률은 보통 20보다 작게 만든다. 그것은 확대경의 배률을 크게 하려면 초점거리가 짧은 렌즈를 써야 하는데 초점거리가 짧을수록 렌즈는 더 볼록해지면서 영상이 이지러지기때문이다.

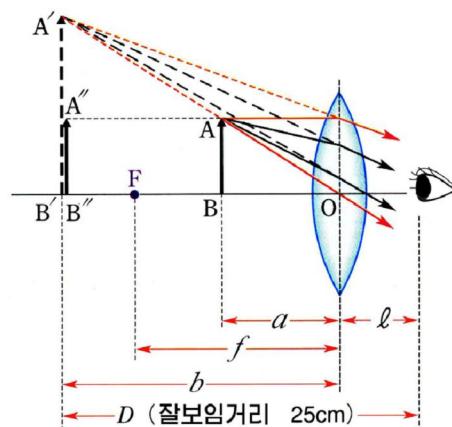
[**례제**] 초점거리가 f인 확대경을 쓸 때 눈이 렌즈로부터 ℓ만큼 떨어져있으면 배률은 얼마인가? 잘보임거리는 D이고 $D > \ell$이다. (그림 1-41)

그림 1-41

풀이. 렌즈와 영상사이거리 $b = D - \ell$

영상은 허영상이므로 $b < 0$이다.

렌즈의 공식 $\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$에서 물체까지 거리를 구하면 다음과 같다.

$$a = \frac{bf}{b - f} = \frac{-(D-\ell)\cdot f}{-(D-\ell) - f} = \frac{(D-\ell)\cdot f}{(D-\ell) + f}$$

배률은 $N=\left|\frac{b}{a}\right|=\frac{D-\ell}{\frac{(D-\ell)\cdot f}{(D-\ell)+f}}=\frac{D-\ell+f}{f}=\frac{D-\ell}{f}+1$

답. $N=\frac{D-\ell}{f}+1$

문 제

1. 왜 확대경으로는 물체를 눈에 매우 가까이 놓아도 똑똑히 보이는가?
2. 광학적세기가 +2.5D인 렌즈로 만든 확대경의 최대배률은 얼마인가?
3. 다음 문장에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 확대경을 리용할 때 물체를 어느곳에 놓아도 항상 확대된 영상이 얻어진다.
   ㄴ) 확대경으로 지도를 볼 때 지도까지의 거리가 가까와질수록 지도의 영상은 점점 커진다.
   ㄷ) 허영상은 사람의 눈의 환각이며 실제로는 빛선이 눈에 절대로 들어오지 못한다.
   ㄹ) 같은 물체라도 가까이에서 보면 먼곳에서 볼 때보다 크게 보이는것은 시각이 커지기때문이다.
4. 초점거리가 5cm인 볼록렌즈로 확대경을 만들수 있다. 물체까지의 거리와 배률을 구하여라.

제6절. 현 미 경

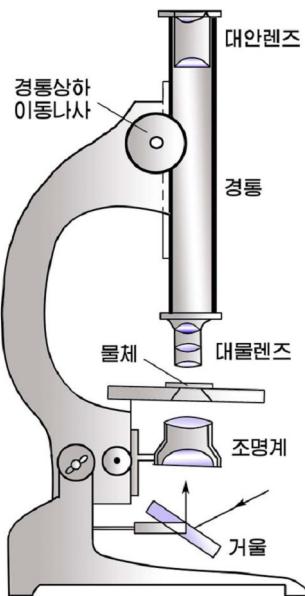
생물체의 세포나 집적회로의 세부들은 크기가 매우 작으므로 확대경으로써는 볼수 없다. 이러한 매우 작은 물체를 똑똑히 보려면 현미경을 써야 한다.

현미경의 광학적구조와 원리

현미경은 매우 작은 물체의 확대된 허영상을 보는 광학기구이며 두개의 볼록렌즈와 그것들을 련결하는 경통으로 되여있다.(그림 1-42)

그림 1-42. 현미경의 구조

이 두개의 렌즈가운데서 물체와 마주 대하고있는 렌즈를 **대물렌즈**, 눈과 마주 대하고있는 렌즈를 **대안렌즈**라고 부른다.

대물렌즈는 대안렌즈에 비하여 초점거리가 더 짧은 볼록렌즈를 쓴다.

현미경에서 어떻게 물체의 확대된 영상을 보게 되는가.(그림 1-43)

물체 h를 대물렌즈의 앞초점 F_1보다 약간 밖에 놓고 조명계로 빛을 쪼여 밝게 해준다.

대물렌즈에 의하여 생긴 확대된 실영상 h'를 대안렌즈의 앞초점 F_2의 약간 안에 놓이게 하여 대안렌즈로 더 확대된 허영상 h''를 얻는다.

이 확대된 허영상은 눈으로부터 잘보임거리에 놓이므로 대안렌즈는 확대경의 역할을 한다.

그림 1-43. 현미경의 원리

이처럼 현미경에서는 확대된 영상을 가까이에서 보게 되므로 시각은 매우 커지고 눈은 잘보임거리에 조절되므로 피로를 느끼지 않고 영상을 자세히 볼수 있다. 이와 같이 현미경에서는 물체의 확대된 거꾸로 생긴 허영상을 본다.

현미경의 배률

물체를 잘보임거리에 놓고 눈으로 직접 볼 때 시각은 확대경(그림 1-39)에서처럼 $\alpha \approx \frac{h}{D}$ 이다.

현미경으로 물체를 볼 때에는 눈을 대안렌즈에 가까이 놓고 본다. 대안렌즈의 초점거리가 매우 짧기때문에 현미경으로 물체의 영상 h''를 보는 시각 α'는 그림 1-43에서 보는것처럼 $\alpha' \approx \frac{h''}{D}$ 이다.

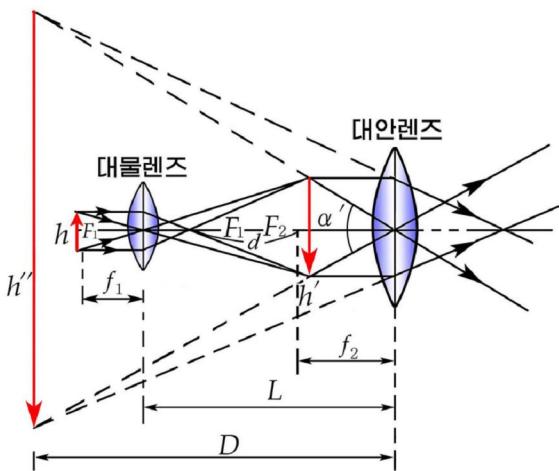
따라서 현미경의 배률은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$N = \frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{h''/D}{h/D} = \frac{h''}{h}$$

한편 대물렌즈에 의하여 생긴 실영상 h'를 대안렌즈(확대경)로 볼 때 생긴 영상 h''는 $h'' = \frac{D}{f_2} \cdot h'$ 와 같다.

그러므로 웃식은 다음과 같이 표시된다.

$$N = \frac{h''}{h} = \frac{\frac{D}{f_2} \cdot h'}{h} = \frac{h'}{h} \cdot \frac{D}{f_2}$$

그런데 $\frac{h'}{h} = N_1$ 는 대물렌즈의 배률이고 $\frac{D}{f_2} = N_2$ 은 대안렌즈의 배률이므로 현미경의 배률은 대물렌즈의 배률과 대안렌즈의 배률을 곱한것과 같다. 즉

$$N = N_1 \cdot N_2$$

현미경의 배률을 경통의 길이 L로 표시하여보자.

현미경에서 대물렌즈와 대안렌즈의 초점사이거리를 d로 표시하면 대물렌즈에 의한 실영상 h'까지의 거리 b_1는 대물렌즈의 초점거리 f_1와 d의 합과 같다.

즉 $b_1 = f_1 + d$이다.

그런데 현미경에서는 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 매우 짧기때문에 이 거리 b_1은 실제상 두 렌즈사이의 거리 즉 경통의 길이 L과 거의 같다. ($b_1 \approx L$)

그러므로 대물렌즈의 배률은 $N_1 = \frac{b_1}{a_1} = \frac{L}{f_1}$이고 대안렌즈의 배률은 확대경과 같이 $N_2 = \frac{D}{f_2}$이다.

따라서 현미경의 배률은 다음과 같이 표시된다.

$$N = N_1 \cdot N_2 = \frac{L}{f_1} \cdot \frac{D}{f_2} = \frac{L \cdot D}{f_1 \cdot f_2}$$

$$N = N_1 \cdot N_2 = \frac{LD}{f_1 f_2}$$ **현미경의 배률**

현미경의 배률은 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 짧을수록 크다.

현미경의 배률은 미리 준비된 초점거리가 다른 대물렌즈 또는 대안렌즈를 바꾸어넣음으로써 변화시킨다.

현미경의 배률은 보통 1 000정도이며 특별한 경우에 2 000정도까지이다.

※ 현미경의 배률은 대물렌즈, 대안렌즈에 각각 《25^》, 《10×》의 방법으로 표시한다.

현미경의 발명

두 렌즈로 이루어진 현미경도 갈릴레이가 발명하였다고 한다.

갈릴레이는 망원경을 만드는 과정에 렌즈들사이의 거리를 알맞춤하게 하면 멀리에 있는 물체를 크게 볼수 있을뿐만아니라 가까이에 있는 물체도 크게 볼수 있다는것을 알게 되였다.

그리하여 1609년에 망원경(갈릴레이망원경)을 완성한데 이어 1610년 현미경을 만들었고 이것으로 곤충과 같은 작은 동물들의 운동기관과 감각기관을 관찰하였다.

문 제

1. 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 각각 18mm, 25mm이고 경통의 길이는 18cm이다. 이 현미경의 배률은 얼마인가?
2. 배률이 800인 현미경의 대물렌즈의 배률이 80이다. 대안렌즈의 초점거리는 얼마인가?
3. 대물렌즈와 대안렌즈에 각각 《$80^{\times}$》, 《$5^{\times}$》라는 표시가 있는 현미경의 경통의 길이가 16cm이다. 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리와 현미경의 배률을 구하여라.
4. 초점거리가 0.8cm와 5cm인 두 볼록렌즈를 20cm 거리를 두고 무어서 만든 현미경으로 물체의 영상을 잘보임거리에 만들자면 물체를 어디에 놓아야 하겠는가? 이 현미경의 배률은 얼마인가?
5. 대물렌즈와 대안렌즈의 초점거리가 각각 1.2cm, 5cm인 현미경으로 잘보임거리에 물체의 영상을 얻었을 때 대물렌즈와 물체사이의 거리는 1.3cm였다. 대물렌즈, 대안렌즈, 현미경의 배률은 각각 얼마인가? 이 현미경의 경통의 길이는 얼마인가?

제7절. 망 원 경

망원경은 멀리 있는 물체를 확대하여보기 위한 광학기구이다.(그림 1-44)

망원경에는 여러가지 종류가 있는데 광학적구조와 원리에 따라 굴절망원경과 반사망원경으로 나눈다.

굴절망원경은 현미경과 마찬가지로 대물렌즈와 대안렌즈로 되여있고 반사망원경은 대물렌즈대신에 구면거울을 리용한 망원경이다.

그림 1-44. 천체망원경

굴절망원경

굴절망원경은 대안렌즈를 볼록렌즈로 썼는가, 오목렌즈로 썼는가에 따라 케플레르망원경과 갈릴레이망원경으로 나눈다.

케플레르망원경. 케플레르망원경은 도이췰란드 천문학자 케플레르가 1611년에 만든것으로서 직경이 크고 초점거리가 긴 볼록렌즈인 대물렌즈와 초점거리가 짧은 볼록렌즈인 대안렌즈로 되여있으며 대안렌즈는 앞뒤로 움직이면서 두 렌즈사이거리를 조절할수 있게 되여있다.

케플레르망원경의 대물렌즈의 뒤초점은 대안렌즈의 앞초점과 거의 일치되여 약간 대안렌즈쪽으로 들어와있다.

케플레르망원경에서 어떻게 물체를 크게 확대하여보게 되는가를 따져보자.(그림 1-45)

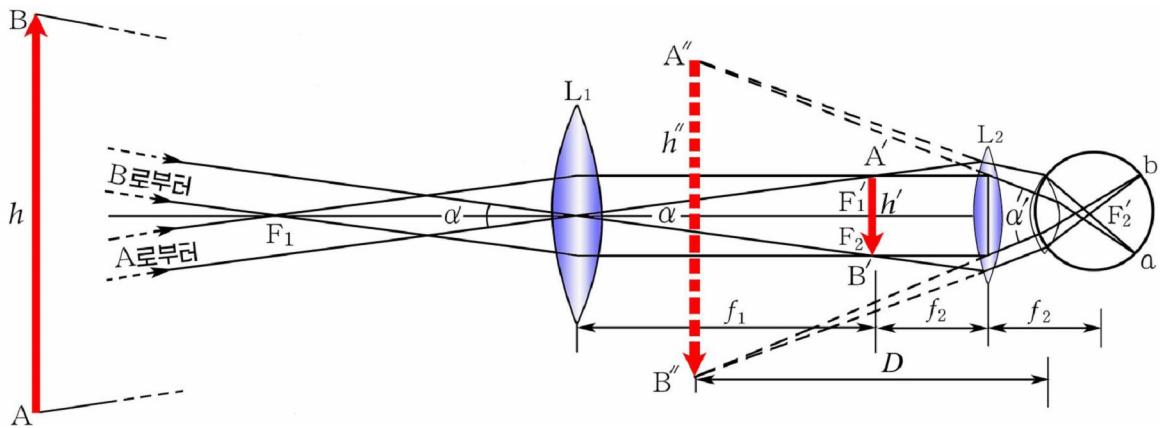



그림 1-45. 케플레르망원경의 광학적구조와 원리

물체 AB가 멀리에 있기때문에 물체에서 나오는 빛은 거의 평행으로 대물렌즈에 들어오므로 대물렌즈에 의한 물체의 영상 A′B′는 거의 대물렌즈의 뒤초점 F_1'의 근방에 생기는 축소된 실영상이다.

한편 경통의 나사장치로 대안렌즈를 앞뒤로 움직여 대물렌즈에 의한 영상 A′B′가 대안렌즈의 앞초점 F_2보다 약간 안에 들어오게 하여 얻은 확대된 허영상 A″B″가 잘보임거리에 놓이게 한다.

그러므로 여기서 대안렌즈는 확대경의 역할을 한다.

케플레르망원경의 배률은 어떻게 되겠는가.

그림 1-45에서 보는것처럼 물체 AB를 눈으로 볼 때의 시각은 $\alpha=\frac{h'}{f_1}$이고 망원경을 거쳐 허영상 A″B″를 보는 시각은 $\alpha'=\frac{h'}{f_2}$이다.

망원경의 배률(N)은 망원경을 통하여 보는 시각 α'와 눈으로 직접 보는 시각 α와의 비와 같으므로 다음과 같다.

$$N=\frac{f_1}{f_2}$$ **망원경의 배률**

망원경의 배률을 크게 하려면 대물렌즈의 초점거리 f_1를 크게 하여야 한다. 그런데 경통의 길이가 $\ell=f_1+f_2$이므로 결국 경통의 길이를 크게 하는것으로 된다.

케플레르망원경에는 대물렌즈에 의한 영상이 대안렌즈의 앞초점면과 거의 일치하므로 대안렌즈의 앞초점면에 +자선과 같은 눈금판(그림 1-46)을 설치할수 있다. 그러므로 케플레르망원경은 측량, 천문관측, 목표조준 등에 쓸수 있다.

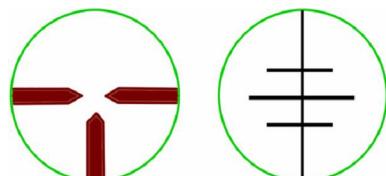



그림 1-46. 눈금판

갈릴레이망원경. 굴절망원경의 다른 하나는 1609년에 갈릴레이가 만든 갈릴레이망원경이다.

갈릴레이망원경은 초점거리가 긴 볼록렌즈를 대물렌즈로 하고 초점거리가 짧은 오목렌즈를 대안렌즈로 하고있다.

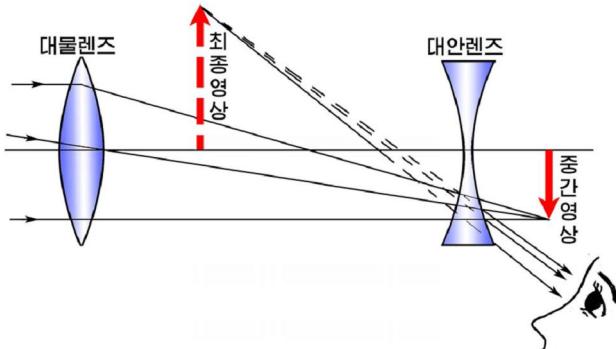
갈릴레이망원경에서 대물렌즈는 케플레르망원경에서처럼 멀리 있는 물체의 작아진 실영상 h'(중간영상)를 뒤초점보다 약간 멀리 맺게 한다.

그런데 오목렌즈로 된 대안렌즈를 실영상 h'와 대물렌즈사이에 놓으면 대물렌즈를 지난 빛선은 실영상 h'를 맺기 전에 대안렌즈를 지나 흩어지므로 사람은 물체의 허영상 h''(최종영상)를 잘보임거리에 놓고 보게 된다.(그림 1-47)

그림 1-47. 갈릴레이망원경의 구조와 원리

이 망원경은 경통의 길이가 짧고 영상이 바로 보인다.

※ 갈릴레이망원경의 경통의 길이는 $\ell = f_1 - f_2$과 같다.

갈릴레이망원경의 배률은 케플레르망원경과 같은 형태로 표시된다.

반사망원경

망원경에서 대물렌즈대신에 직경이 크고 초점거리가 긴 오목거울을 쓰기도 한다. 이러한 망원경이 반사망원경이다.

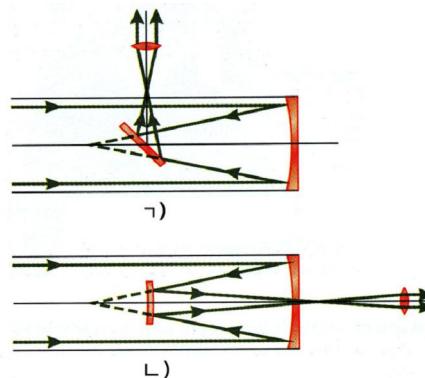
반사망원경은 1668년에 뉴톤이 처음으로 만들었다.

※ 굴절망원경에서 배률을 높이자면 대물렌즈의 직경과 초점거리를 크게 하여야 하는데 여기에서 기술적으로 제기되는 점들이 많다. 그러므로 대물렌즈대신에 오목거울을 쓴다.

먼곳의 물체에서 오는 빛들은 거의 평행이므로 오목거울에서 반사된 후 그의 초점근방에 있는 거울에서 반사되여 실영상을 만든다. 이 실영상을 대안렌즈로 확대하여 더 커진 허영상을 눈으로 보게 된다.(그림 1-48)

※ 반사망원경에서는 오목거울(포물면거울)에서 반사된 빛들을 어떤 거울(평면거울 또는 오목거울)로 반사시켜 영상을 얻는가에 따라 여러가지로 나눈다.

그림 1-48. 반사망원경의 구조와 원리

최신형반사망원경의 오목거울은 직경이 10m인데 36개의 쪼각거울들을 모아서 만들었다.

쌍 안 경

망원경으로 물체를 볼 때에는 한눈으로만 보므로 립체감이 없어진다.

그러므로 두개의 망원경을 빛축을 평행으로 무어 두눈으로 보게 함으로써 립체적보기효과를 높인것이 쌍안경이다.(그림 1-49)

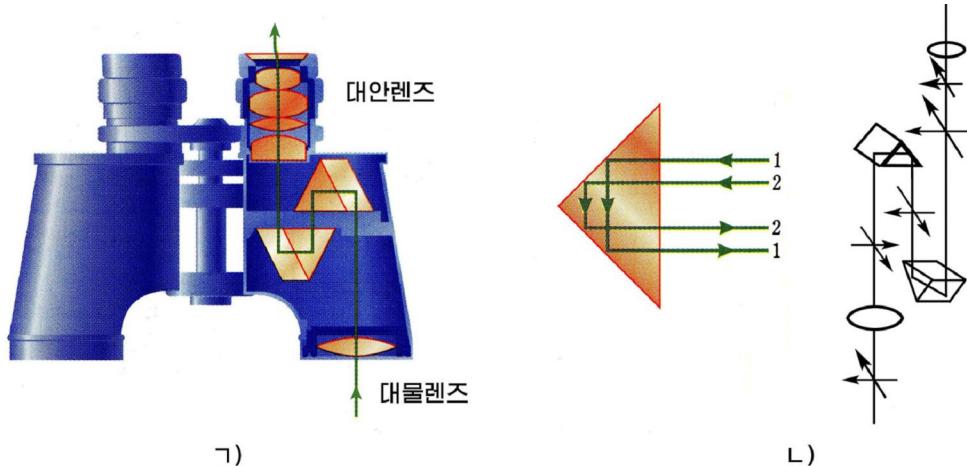



그림 1-49. 쌍안경

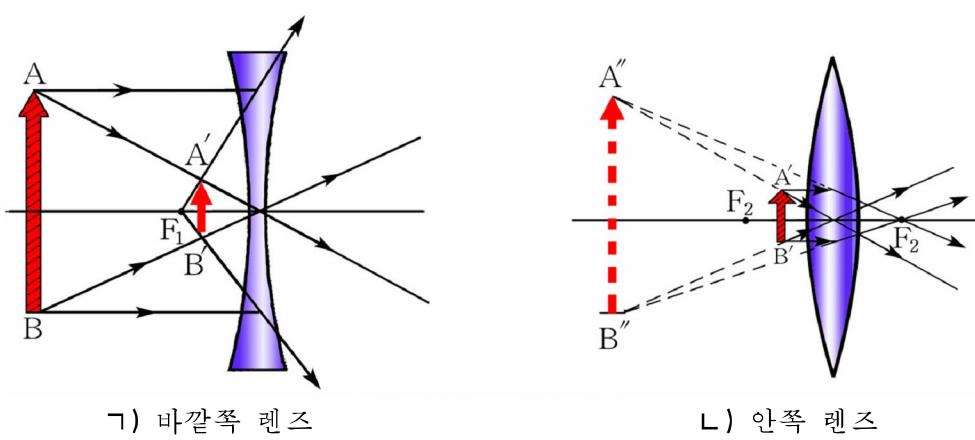
케플레르망원경에서는 물체가 거꾸로 보이므로 케플레르망원경으로 만든 쌍안경에서는 두쌍의 전반사프리즘을 써서 영상을 바로잡으며 경통의 길이를 짧게 한다.

갈릴레이망원경에서는 영상이 바로 서므로 전반사프리즘을 쓰지 않고 두개의 갈릴레이망원경의 빛축을 평행으로 놓아 쌍안경을 만든다. 이러한것이 바로 관람용쌍안경이다.

생각하기 문감시경은 문안쪽에서 바깥쪽을 보기 위한 광학기구이다.(그림 1-50) 문감시경의 원리는 무엇인가?

ㄱ) 바깥쪽 렌즈　　ㄴ) 안쪽 렌즈

그림 1-50. 문감시경

문 제

1. 망원경으로 보게 되는 허영상은 실제물체보다 크지 못하다. 그러나 망원경으로 물체를 크게 보는것은 무엇때문인가?
2. 망원경의 성능을 좋게 하려면 왜 경통의 길이를 길게 하여야 하는가?
3. 대물렌즈의 초점거리가 50cm인 케플레르망원경으로 별을 보다가 10m 앞에 있는 물체를 보려면 어느쪽으로 얼마만큼 대안렌즈를 움직여야 하는가?
4. 초점거리가 20cm인 볼록렌즈를 대물렌즈로 하고 배률이 5인 볼록렌즈를 대안렌즈로 한 망원경의 배률은 얼마인가? 대안렌즈를 같은 배률의 오목렌즈로 바꾸면 무엇이 어떻게 달라지겠는가?
5. 갈릴레이망원경의 배률은 3이고 망원경의 길이(대물렌즈와 대안렌즈사이거리)는 5cm이다. 대물렌즈와 대안렌즈의 광학적세기는 얼마인가?

제 8 절. 비침도법칙

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《사람들의 눈이 나빠지지 않도록 실내조명도 잘하여야 합니다.》

조명을 잘하는것은 사람들의 눈을 보호하고 생산능률을 높이는데서 매우 중요하다.

조명을 잘하려면 광원과 빛을 받는 면의 밝기를 평가하는 량들과 그 단위들을 잘 알고 바로 써야 한다.

빛 세 기

광원들이 같은 거리에 있는 물체를 비쳐주는 정도는 광원에 따라 다르다. 즉 광원으로부터 빛이 얼마나 세게 나오는가 하는것은 광원에 따라 다른데 이것을 표시하기 위해 빛세기라는 량을 쓴다.

점광원으로부터 어떤 방향의 단위립체각속으로 단위시간동안에 나오는 빛에네르기를 광원의 **빛세기**라고 부른다.

립체각이란 무엇인가.

구면의 중심 O에 정점을 둔 원뿔이 구면과 사귀는 면적을 ΔS라고 할 때 이 원뿔안의 공간을 면 ΔS에 대하여 점 O가 가지는 **립체각**이라고 부른다.(그림 1-51)

립체각의 단위로는 1sr(**스테라디안**)을 쓴다.

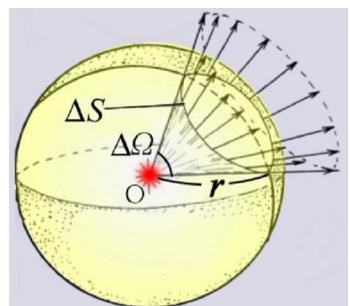



그림 1-51. 립체각

1sr은 1m^{2}인 면을 1m 거리에서 수직으로 바라보는 립체각과 같다.

구의 중심에서 전체 구면을 바라보는 립체각은 전체 구면의 면적이 $4\pi r^2$이므로 다음과 같다.

$$\Omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ [sr]}$$

점광원으로부터 Δt [s]시간동안에 $\Delta\Omega$ [sr]의 립체각속으로 ΔW [J]인 빛에네르기가 나온다면 빛세기는 다음과 같다.

$$I = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot \Delta\Omega}$$

빛세기의 단위는 1cd(**칸델라**)이다. 1cd는 주파수가 540×10^{12}Hz인 단색광원이 어떤 방향으로의 1sr의 립체각속으로 1s동안에 내보내는 빛에네르기가 $\frac{1}{683}$J일 때의 빛세기와 같다.

빛측정량들의 단위는 1cd를 기본단위로 하여 구성한다.

빛 흐 름

어떤 면을 단위시간동안에 통과하는 빛에네르기를 **빛흐름**이라고 부른다.

빛에네르기가 Δt 시간동안에 어떤 면(또는 립체각)을 ΔW 만큼 흘렀다면 빛흐름은 다음과 같다.

$$\Delta \Phi = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot \Delta\Omega} \cdot \Delta\Omega = I \cdot \Delta\Omega$$

빛흐름의 단위는 1ℓm(**루멘**)이다. 1ℓm은 빛세기가 균일하게 1cd인 점광원으로부터 1sr의 립체각속으로 흘러나오는 빛흐름과 같은 량이다.

$$1\,\ell\text{m} = 1\text{cd} \times 1\text{sr}$$

빛세기가 I인 점광원으로부터 $\Delta\Omega$인 립체각속으로 나오는 빛흐름($\Delta\Phi$)은 다음과 같다.

$\Delta\Phi = I \cdot \Delta\Omega$ **빛 흐 름**

빛세기가 I인 점광원에서 나오는 전체 빛흐름은 얼마인가.

점광원이 모든 방향으로 빛을 고르롭게 내보낸다면 전체 립체각은 4π [sr]이므로 점광원이 내보내는 전체 빛흐름은 다음과 같다.

$$\Phi = 4\pi I$$

비 침 도

빛을 받는 면의 밝기는 비침도로 표시한다.

단위면적에 입사되는 빛흐름을 **비침도**라고 부른다.

면적이 ΔS인 면에 $\Delta\Phi$만 한 빛흐름이 입사한다면 면의 비침도(E)는 다음과 같다.

$$E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta S}$$ **비 침 도**

비침도의 단위는 1 ℓx(**룩스**)이다. 1 ℓx는 1m^2인 면에 1 ℓm의 빛흐름이 입사할 때의 면의 비침도와 같다.

$$1\,\ell x = 1\,\ell m/m^2$$

빛세기가 I[cd]인 점광원으로부터 r[m]만큼 떨어져있는 면 ΔS [m^2]에 빛이 α의 입사각으로 입사할 때 면의 비침도를 구하여보자.

그림 1-52. 면의 비침도

비침도공식에서 $\Delta\Phi = I\cdot\Delta\Omega$이므로 $E=\frac{\Delta\Phi}{\Delta S}=\frac{I\cdot\Delta\Omega}{\Delta S}$이며 입사각이 α일 때 $\Delta\Omega=\frac{\Delta S_0}{r^2}=\frac{\Delta S\cdot\cos\alpha}{r^2}$이므로 다음과 같다.(그림 1-52)

$$E=\frac{I\cdot\cos\alpha}{r^2}$$ **비침도법칙**

빛을 받는 면의 비침도는 광원의 빛세기와 입사각의 코시누스에 비례하고 광원으로부터 면까지의 거리의 두제곱에 거꿀비례한다. 이것을 **비침도법칙**이라고 부른다.

빛을 받는 면의 비침도는 비침도계로 잰다.(그림 1-53)

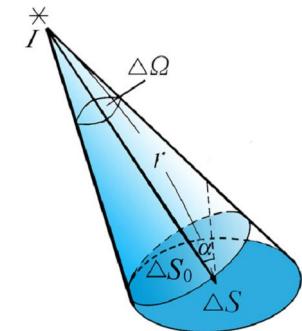
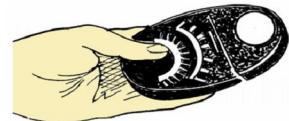



그림 1-53. 비침도계

생각하기 면의 비침도가 왜 거리의 두제곱에 거꿀비례하는가?

[**레제**] 그림 1-54와 같이 빛세기가 100cd 및 50cd인 두 전등이 바닥으로부터 4m, 3m 높이에 매달려있다. 두 전등의 드림선아래에 있는 바닥밑점사이의 거리는 7m이다. 첫 전등의 밑점으로부터 3m, 둘째 전등의 밑점으로부터 4m 되는 점 P에서의 비침도는 얼마인가?

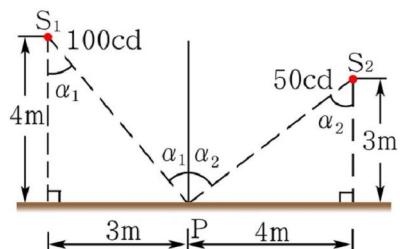
풀이. 주어진것: $I_1=100\text{cd},\ I_2=50\text{cd}$

$h_1=4\text{m},\ h_2=3\text{m}$

$\ell_1=3\text{m},\ \ell_2=4\text{m}$

구하는것: E?

그림 1-54

주어진 점으로부터 광원까지의 거리는 피다고라스의 정리를 리용하여 구한다.

즉 $r_1=\sqrt{h_1^2+\ell_1^2}=\sqrt{4^2+3^2}=5(\text{m})$

$$r_2=\sqrt{h_2^2+\ell_2^2}=\sqrt{3^2+4^2}=5(\text{m})$$

두 전등으로부터 나와 점 P에 입사하는 빛의 입사각의 코시누스는

$$\cos\alpha_1=\frac{h_1}{r_1}=\frac{4}{5},\quad \cos\alpha_2=\frac{h_2}{r_2}=\frac{3}{5}$$

따라서 점 P에서의 비침도는

$$E=E_1+E_2=\frac{I_1}{r_1^2}\cos\alpha_1+\frac{I_2}{r_2^2}\cos\alpha_2=\frac{100}{5^2}\times\frac{4}{5}+\frac{50}{5^2}\times\frac{3}{5}=4.4(\ell x)$$

답. $4.4\,\ell x$

문 제

1. 방안에서의 비침도는 비침도법칙을 써서 계산한것보다 더 크다. 왜 그런가?
2. 빛세기가 100cd인 두 전등이 바닥으로부터 2m 높이에 2m 간격으로 걸려있다. 전등의 바로 밑점들과 그 중간점에서 바닥의 비침도를 구하여라.
3. 길이 1.5m, 너비 1m인 책상의 가운데점으로부터 높이 1.5m인 곳에 120cd인 전등이 있다. 책상에서 제일 밝은 곳과 제일 어두운 곳의 비침도를 계산하여라.
4. 전등갓을 씌우거나 탁상등을 쓰면 전기를 절약할수 있다. 왜 그런가?
5. 점광원의 빛세기가 200cd이다. 이 광원이 내보내는 전체 빛흐름과 빛선의 방향에 수직인 면의 비침도는 얼마인가? 면은 광원으로부터 5m 거리에 있다.
6. 벽으로부터 얼마 떨어진 거리에 평면거울을 세우고 벽과 거울가운데에 광원을 놓았다. 벽에서의 비침도는 거울이 없을 때보다 몇배로 커지겠는가?

문제 1. 렌즈에 넓은 평행빛묶음이 입사할 때 초점은 점으로 되지 못하고 퍼져 작은 원을 이룬다. 이러한 렌즈의 결함이 구면수차이다. 렌즈의 구면수차의 원인과 그것을 작게 하는 방도를 찾아보아라.

방향.
- 렌즈를 작은 프리즘의 모양으로 보면 매 요소프리즘에서 무엇이 차이나는가?
- 렌즈에 넓은 빛묶음(빛축에서 멀리 떨어진 평행빛선들의 모임)이 입사할 때 어떤 빛선들이 세게 또는 약하게 기울어지겠는가?
- 렌즈의 구면수차를 작게 하려면 어떻게 해야 하겠는가?
- 고급한 렌즈는 어떻게 만들겠는가?

문제 2. 구면반경이 R_1, R_2이고 굴절률이 n인 렌즈의 광학적세기는 $A=\frac{1}{f}=(n-1)(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2})$ 이다. 왜 그런가를 따져보아라.

방향.
- 프리즘에서 빛이 굴절될 때 기울어짐각은 어떻게 되는가?
- 근축빛선에서 $\alpha\approx\sin\alpha$ 임을 고려하여라.

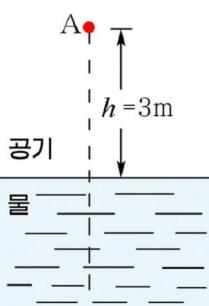
복습문제

1. 다음의 [ ]안에 알맞는 답을 써넣어라.
   두 평면거울 M_1와 M_2 사이각은 θ이고 입사빛선이 거울면 M_2에 평행이다. 두 평면거울에서 반사되여나오는 반사빛선이 거울면 M_1에 평행이라면 두 거울면사이각 θ는 [ ]이다.
   ㄱ) $\theta=30°$ ㄴ) $\theta=45°$ ㄷ) $\theta=60°$ ㄹ) $\theta=75°$
2. 두께가 2cm인 에테르층이 깊이가 3cm인 물우에 떠있다. 이것을 드림선우에서 내려다보면 액체전체의 깊이는 얼마로 보이겠는가? 에테르와 물의 굴절률은 각각 1.36 및 1.33이다.

   (답. 3.7cm)
3. 그림 1-55와 같이 물면으로부터 3m만 한 높이에 광원 A가 있다. 이 광원을 물속에서 드림선우로 올려다보면 얼마만한 높이에 있는것으로 보이겠는가? 물의 굴절률은 $n=\frac{4}{3}$이다.

   (답. 4m)

그림 1-55

4. 초점거리가 30cm인 오목거울로 자기 눈의 바로선 영상을 잘보임거리에서 보자면 거울을 어디에 놓아야 하겠는가?

   (답. 10cm)
5. f=5cm인 볼록거울로 자기 얼굴의 영상을 자기 눈으로부터 25cm 앞에 만들려고 한다. 얼굴과 거울사이거리를 얼마로 해야 하겠는가?

   (답. 약 21cm)
6. 초점거리가 6cm인 오목거울과 평면거울이 16cm 되는 거리에 있다. 두 거울사이에 초불을 놓되 그의 영상이 초불과 일치하게 하려면 초불을 어디에 놓아야 하는가?

   (답. 9.6cm)
7. 유리로 된 그릇에 물이 담겨있다. 물결면에 어떤 입사각으로 빛이 들어올 때 그릇의 옆면(수직유리벽)으로 빛이 나오지 못하겠는가?(그림 1-56)

   (답. $\alpha \leq 61° 52'$)
8. 그릇의 깊이가 50cm인 물의 바닥에 높이 10cm, 직경 24cm인 원통형그릇을 놓고 그속에 전등을 설치하였다. 이 원통형그릇은 우로 열려져있고 불투명체로 만들었다. 전등불빛이 물결면에서 전반사되여 물바닥을 비치는 면적을 구하여라.(그림 1-57)

   (답. $0.37m^2$)

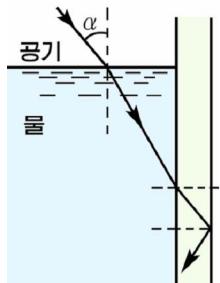



그림 1-56

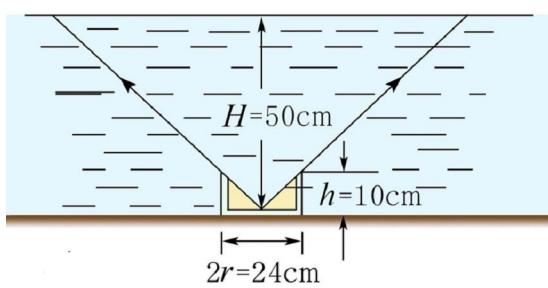



그림 1-57

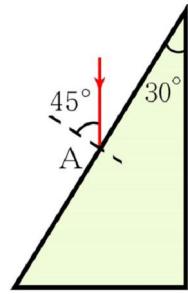



그림 1-58

9. 그림 1-58과 같이 굴절률이 $\sqrt{2}$ 이고 한 각이 30° 인 직3각형프리즘의 빗변의 한 점 A에 45° 의 입사각으로 빛이 입사한다. 프리즘을 지나오는 빛선의 경로를 그리여라.

10. 그림 1-59의 3개의 검은 함속에 평면거울, 렌즈, 구면거울중에서 어느 하나가 들어있다.(평면거울, 렌즈, 구면거울은 각각 1개뿐이다.) 검은 함속에 어떤 광학기구가 들어있는가를 확증하고 그의 위치와 빛선의 경로를 그려라.

ㄱ)　　ㄴ)　　ㄷ)

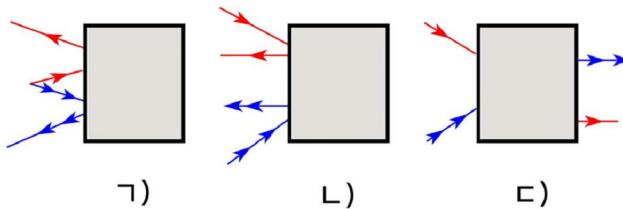



그림 1-59

11. 그림 1-60과 같이 반경이 20cm인 오목거울과 초점거리가 10cm인 볼록렌즈가 빛축이 일치되게 놓여있다. 렌즈로부터 15cm 거리에 물체를 빛축에 수직되게 놓았을 때 4배로 커진 오목거울에 의한 허영상을 얻으려고 한다. 렌즈와 오목거울 사이거리를 얼마로 해야 하겠는가?

(답. 35cm)

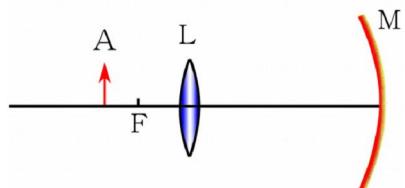



그림 1-60

12. 볼록면의 반경이 15.5cm인 평볼록렌즈 두개가 볼록면을 접하고있다.(그림 1-61) 앞에 있는 렌즈로부터 25cm 앞에 점광원 S가 있다. S의 영상은 어디에 생기겠는가?
렌즈를 만든 유리의 굴절률은 1.62이고 렌즈의 두께는 무시한다.

(답. 25cm)

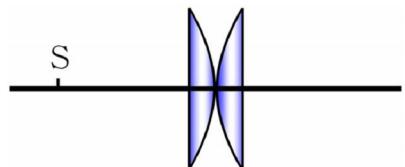



그림 1-61

13. 볼록렌즈로 물체의 실영상을 비춤판에 얻은 다음 렌즈를 30cm만큼 비춤판쪽으

로 옮겼더니 비춤판에 또다시 물체의 실영상이 맺힌다. 물체와 비춤판사이의 거리는 90cm이다. 렌즈의 초점거리와 광학적세기를 구하여라.

(답. 20cm, 5D)

14. 물체가 초점거리가 12cm인 볼록렌즈의 중심으로부터 18cm 거리에 있다. 렌즈의 뒤 초점에 빛축에 수직으로 평면거울이 놓여있다. 물체의 영상이 어디에 맺히겠는가?(그림 1-62)

(답. 렌즈로부터 6cm 앞에 생긴다.)

그림 1-62

15. 물체의 실영상이 렌즈로부터 50cm 되는 곳에 맺혔다. 렌즈와 영상사이에 렌즈로부터 20cm 떨어진 곳에 오목렌즈를 놓았더니 영상이 30cm만큼 더 멀어졌다. 오목렌즈의 초점거리는 얼마인가?

(답.-60cm)

16. 사진찍는 방향에 대하여 수직방향으로 속도 60km/h로 운동하는 자동차를 100m 거리에서 사진 찍는다. 사진기의 대물렌즈의 초점거리는 5cm이다. 사진에서 영상의 움직임이 0.01cm를 넘지 않도록 하기 위하여서는 얼마만한 로출시간이 필요한가?

(답. 0.012s)

17. 벽으로부터 90cm 떨어진 곳에 광원이 있다. 초점거리가 20cm인 볼록렌즈를 5cm/s의 속도로 벽에 수직인 빛축을 따라 벽으로부터 광원쪽으로 옮겨갈 때 광원의 실영상이 벽우에 똑똑히 생긴 때로부터 다시 똑똑히 생길 때까지 시간이 얼마나 걸리겠는가?

(답. 6s)

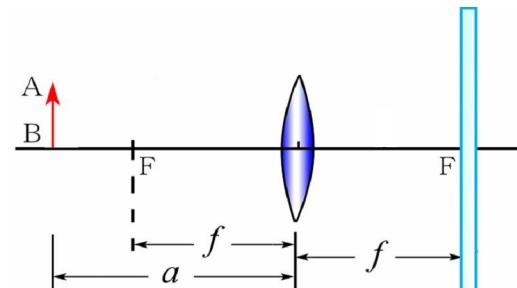
18. 두께가 10mm인 평행평면으로 된 유리판의 밑바닥의 표식이 보이도록 조절한 현미경으로 유리판의 웃면의 표식을 똑똑히 보기 위하여 현미경을 6.6mm만큼 끌어올렸다. 유리판의 굴절률을 구하여라.

(답. 1.52)

19. 현미경과 망원경이 광학적으로 다른 점은 무엇인가?

20. 망원경의 대물렌즈와 대안렌즈사이의 거리는 최소 55cm이고 배률은 10이다. 두 렌즈의 초점거리는 각각 얼마인가?

(답. 50cm, 5cm)

21. 초점거리가 1m인 대물렌즈를 써서 배률이 25인 천체망원경을 만들려고 한다.

그리고 경통의 길이를 조절하여 10m의 가까운 거리에 있는 물체까지 똑똑히 볼수 있게 하려고 한다. 대안렌즈의 초점거리와 경통의 최소 및 최대길이를 구하여라.

(답. 4cm, 104cm, 115cm)

22. 배률이 10인 대안렌즈를 맞추어 반사망원경의 배률이 50이 되게 하려면 반경이 얼마인 오목거울을 써야 하겠는가? 이 망원경으로 달을 보면 영상의 직경은 얼마로 보이겠는가? 맨눈으로 달의 직경을 보는 시각은 31′이다.

(답. 2.5m, 11.3cm)

23. 영사기필림문의 너비는 1.2cm이고 영사막의 너비는 2.4m이다. 영사막의 비침도는 4 ℓx보다 작지 말아야 한다. 영사기필림문의 최소비침도를 구하여라.

(답. 1.6×10^5 ℓx)

24. 그림 1-63과 같이 책상에서 1m 높이에 빛세기가 40cd인 전등이 켜있고 전등아래 25cm 거리에 초점거리가 25cm인 볼록렌즈가 있다. 책상면의 P점에서 비침도는 얼마인가? 만일 렌즈가 없다면 비침도는 얼마이겠는가?

(답. 640 ℓx, 40 ℓx)

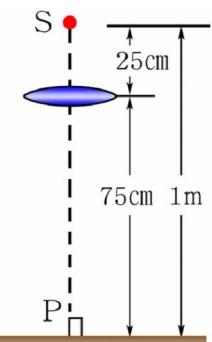



그림 1-63

25. 초점거리가 20cm인 오목거울의 빛축우에 거울로부터 10cm 앞에 모든 방향으로 빛을 고르롭게 내보내는 점광원이 놓여있다. 거울앞에 광원으로부터 1m 되는 거리에 빛축에 수직으로 비춤판을 세웠다면 오목거울이 있을 때와 없을 때 비춤판우의 빛축근방의 비침도는 어떻게 변하는가?(그림 1-64)

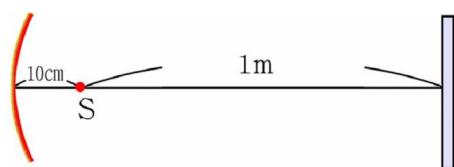
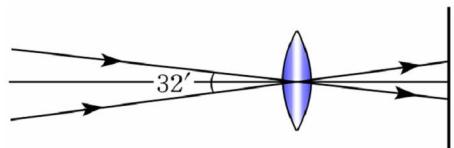
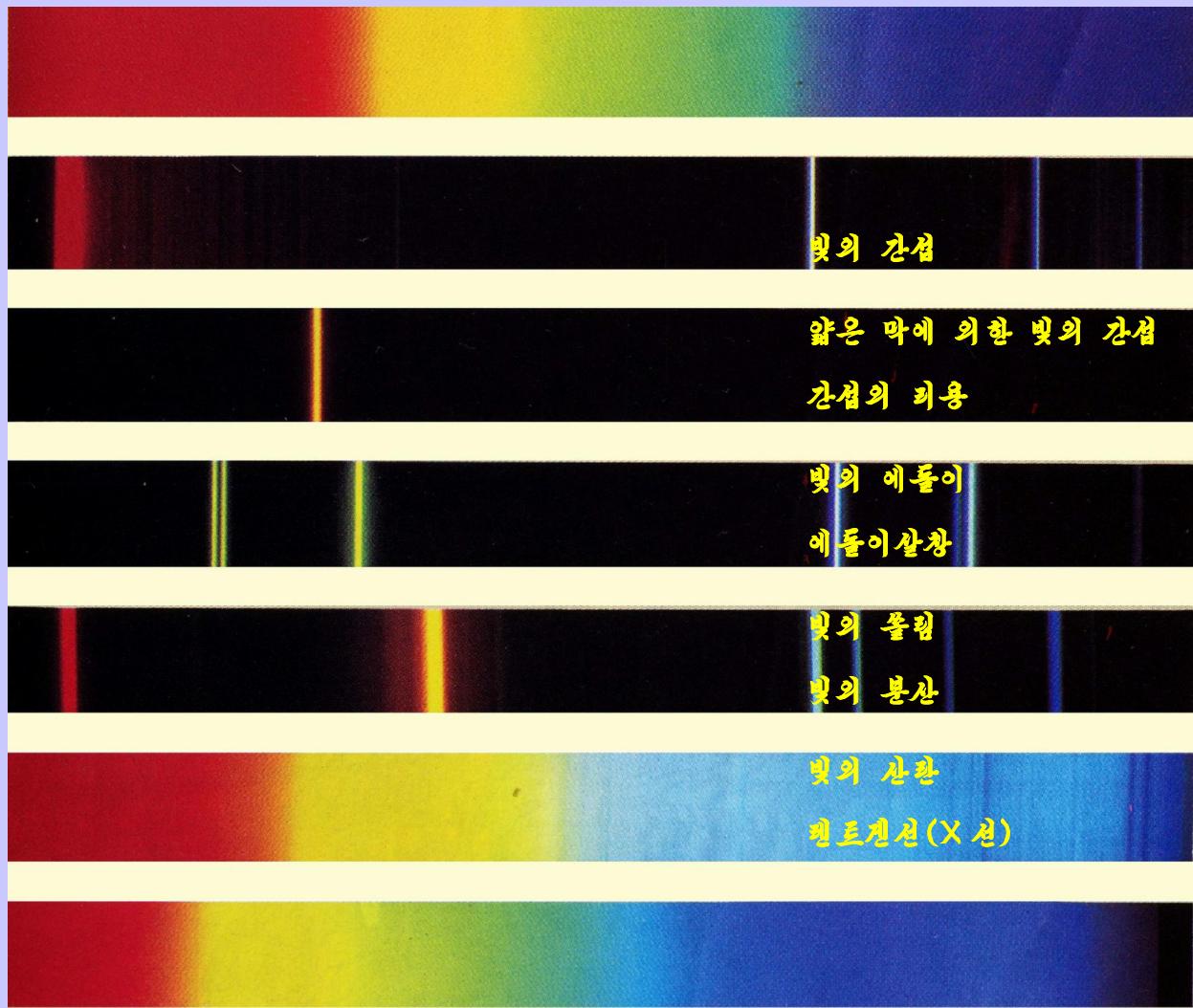



그림 1-64

(답. 약 3.4배)

26. 초점거리가 50cm이고 직경이 9cm인 수렴렌즈로 태양의 영상을 얻었다. 해빛에 수직인 면의 비침도가 10^5 ℓx이라면 태양영상의 비침도는 얼마인가? 지구에서 태양의 직경을 보는 각은 32′이다.(그림 1-65)

그림 1-65

(답. 3.7×10^7 ℓx)

제2장. 빛 파 동

빛에 대한 오랜 기간의 연구과정에 빛을 립자들의 흐름으로 보는 립자설과 파동으로 보는 파동설을 주장하는 사람들사이에 론쟁이 거듭되여왔다.

간섭과 에돌이는 파동에만 고유하게 나타나는 현상이다.

그러므로 간섭과 에돌이는 파동의 본질을 밝히는데서 매우 중요한 현상으로 된다.

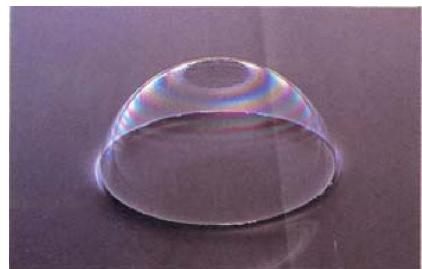
빛을 파동으로 볼수 있는 근거는 무엇이며 파동으로서의 빛의 성질은 무엇인가.

이 장에서는 이러한 문제점을 제기하고 그에 대한 해명을 위주로 전개한다.

제 1 절. 빛의 간섭

그림 2-1. 비누물방울

우리는 비가 온 뒤 도로에서 물우에 퍼진 휘발유기름막의 색무늬 그리고 비누물방울이나 비누물막에 고운 색무늬가 형성되는것을 많이 보아왔다.(그림 2-1)

이런 현상은 빛을 파동으로 보아야 설명할수 있다.

양그의 실험

빛이 파동이라면 다른 력학적파동이나 전자기파에서처럼 간섭현상이 나타나야 할것이다.

양그는 19세기초에 빛의 간섭무늬를 얻어내고 그에 대한 해석을 함으로써 빛의 파동성을 증명하였다.

그림 2-2와 같이 단색광원(레하면 누런색등) 앞에 너비가 매우 작은 하나의 실틈 S_0이 있는 가림판을 놓고 그로부터 일정한 거리만큼 떨어져 두개의 실틈 S_1, S_2이 있는 가림판을 처음가림판에 평행되게 놓는다. 이때 비춤판에는 밝고 어두운 자리가 엇바뀌여 나타나는데(그림 2-3) 이것을 **빛의 간섭무늬**라고 부른다.

그림 2-2. 양그의 실험

빛의 간섭무늬는 다음과 같이 설명된다.

단색광원으로부터 빛을 받은 실틈 S_0은 2차파를 내보내는 요소파원으로 되고 여기서 나온 빛이 실틈 S_1, S_2에 이르면 이 틈들도 요소파원으로 되여 2차파를 내보낸다.

이 2차파들이 중첩하여 간섭무늬를 이룬다.

두 파원 S_1, S_2 로부터 비춤판의 점 P까지의 거리차 $\Delta r = |r_1 - r_2|$가 파장의 옹근수배 즉 $\Delta r = k\lambda (k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots)$가 되는 자리들에서는 두 파동이 같은자리각으로 겹치므로 간섭의 극대(밝은 자리)로 된다.

Δr 가 반파장의 홀수배 즉 $\Delta r = (2k+1)\lambda/2$가 되는 자리들에서는 두 파동이 반대자리각으로 겹쳐서 간섭의 극소(어두운 자리)로 된다.

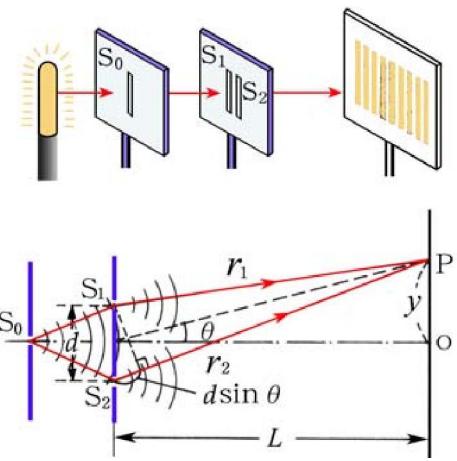
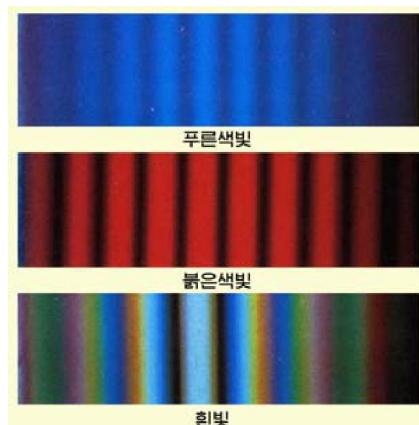



그림 2-3. 빛의 간섭무늬

S_1, S_2사이 거리를 d, 실틈판과 비춤판사이의 거리를 L, 비춤판의 중심 O로부터 P까지의 거리를 y로 표시하면 $d \ll L$인 조건에서 $\Delta r = d\sin\theta \approx d\frac{y}{L}$로 된다.

따라서 비춤판의 중심으로부터 밝은 띠(극대)와 어두운 띠(극소)까지의 거리는 다음과 같이 결정된다.

$$y_{극대} = k\frac{L\lambda}{d} \quad \text{비춤판의 중심으로부터 극대점까지의 거리}$$

$$y_{극소} = (2k+1)\frac{L\lambda}{2d} \quad \text{비춤판의 중심으로부터 극소점까지의 거리} \qquad (1)$$

$$(k = 0, \pm1, \pm2, \cdots)$$

띠사이간격(극대사이간격)은 다음과 같다.

$$\Delta y = \frac{L\lambda}{d} \qquad (2)$$

⚠ 빛의 간섭무늬를 똑똑히 보려면 실틈 S_0의 너비가 매우 좁고 실틈 S_1, S_2사이 간격 d가 작아야 한다.

식 1에서 차수 k가 같아도 파장 λ가 다르면 $y_{극대}$도 달라진다. λ가 클수록 비춤판중심으로부터 더 먼 자리에 극대무늬가 나타난다.

양그의 실험장치에서 단색빛대신 흰빛을 쓰면 비춤판에는 색무늬가 나타난다.

간섭성광원

양그의 실험장치에서 실틈 S_0은 왜 있는가.

실틈 S_0이 꼭 있어야 하는가.

우리는 일상생활에서 여러 광원에서 나오는 빛들이 겹치는것을 흔히 보는데 간섭무늬는 보기 힘들다.

실례로 교실이나 방안에 2개이상의 전등이 켜있지만 벽에서 또는 바닥에서 간섭무늬를 볼수 없다.(그림 2-4) 왜 그런가.

그것은 일반적으로 이 광원들이 간섭조건을 만족시키지 않기때문이다.

그림 2-4. 서로 다른 광원에서 나온 빛은 간섭하지 않는다

보통 광원의 매개 점은 일정한 진동수의 조화파동을 계속 내보내지 않고 제가끔 다른 시각에 짧은 토막파들을 내보낸다. 이런 파동들은 자리각차가 일정하지 않고 무질서하게 변하므로 간섭무늬를 이루지 못한다. 그러므로 다른 광원이나 한 광원의 다른 점들에서 나온 빛들은 간섭하지 않는다. 보통광원

으로 간섭무늬를 얻으려면 양그의 실험에서처럼 한 점(실틈 S_0)에서 나온 빛을 갈랐다가 다시 겹치게 하여야 한다.(그림 2-5)

실틈 S_1, S_2은 S_0에서 나온 빛을 갈라서 간섭조건을 만족하는 빛들로 되게 한다.

이와 같이 간섭조건을 만족시키는 빛을 내는 광원(실틈 S_1, S_2)을 **간섭성광원**이라고 부른다.

그림 2-5. 한 점에서 나온 빛을 갈랐다가 겹치게 한다

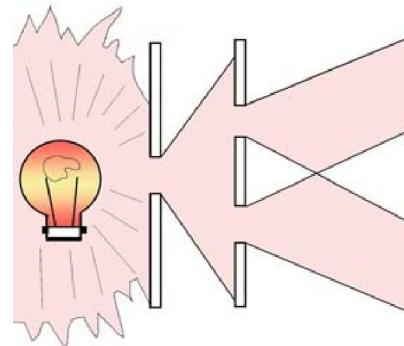
레이자는 좋은 간섭성광원이다. 레이자의 서로 다른 점에서 나오는 빛들은 간섭할수 있다. 때문에 레이자로 간섭실험을 할 때에는 양그의 실험장치에서처럼 실틈 S_0이 없어도 된다.

광학적경로

굴절률이 n인 매질속에서 빛속도는 c/n(c: 진공속에서 빛속도)와 같으므로 ℓ만한 경로를 지나는 시간은 진공속에서 $n\ell$만큼 지나는 시간과 같다.

즉 빛이 매질속을 지날 때에는 같은 길이의 진공속을 지날 때보다 시간이 n배 더 걸린다. 따라서 파장도 $v=\lambda\nu$에 따라 $1/n$배로 짧아진다.

그러므로 굴절률이 n인 매질속에서는 빛의 경로가 n배 더 커진것으로 보고 계산해야 한다. 경로의 길이 ℓ에 굴절률을 곱한 값 $n\ell$을 **광학적경로**라고 부른다.

⚠ 간섭무늬의 극대, 극소자리를 계산하는 식에서 Δr는 철저히 광학적경로차로 되여야 한다.

문 제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 표시하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 양그의 실험에서 흰색광원을 쓰면 간섭무늬가 생기지 않는다.
   ㄴ) 보통광원으로는 반드시 간섭무늬를 얻을수 없다.
   ㄷ) 보통광원으로 간섭무늬를 얻자면 반드시 한 점에서 나온 빛을 갈랐다가 겹치게 하여야 한다.
2. 양그의 실험에서 흰색광원을 쓰고 실틈 S_1와 S_2뒤에 색이 다른 유리판들을 놓으면 간섭무늬가 생기겠는가?
3. 두 실틈사이 간격이 0.1mm이고 실틈판과 비춤판사이 거리가 60cm인 양그의 실험장치에서 파장이 590nm인 빛의 간섭무늬의 띠들사이 간격은 얼마인가?

제 2 절. 얇은 막에 의한 빛의 간섭

얇은 막에서 반사하는 빛의 간섭

얇은 막에 생기는 간섭무늬를 보자.

실험

○ 비누물을 풀어놓고 쇠줄고리를 잠그었다꺼내여 막이 생기게 하고 드림면방향으로 드리운다.

○ 이 막에 흰빛(태양빛)을 비추고 비누물막을 관찰한다. 막에는 수평방향의 고운 색띠들로 이루어진 간섭무늬가 생긴다. 색띠들은 아래로 내려가면서 간격이 좁아진다.(그림 2-6)

그림 2-6. 비누물막에 생긴 간섭무늬

막에 생기는 간섭무늬는 다음과 같이 설명된다.

그림 2-7과 같이 굴절률이 n이고 두께가 d인 얇은 막에 파장이 λ인 단색빛이 거의 수직으로 들어간다고 하자.

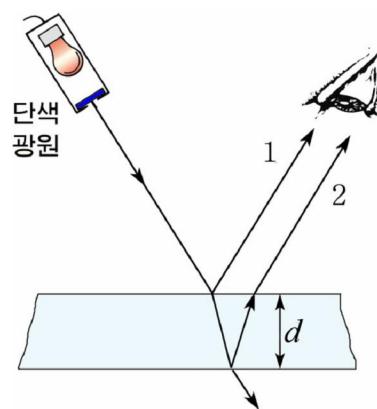
빛의 일부는 막의 첫 경계면에서 반사되며 일부는 막으로 들어갔다가 막의 둘째 경계면에서 반사되여나온다. 반사빛 1, 2는 한 점에서 갈라졌다가 중첩되므로 간섭조건을 만족시키며 따라서 간섭무늬가 형성된다.

그림 2-7. 얇은 막에서 빛의 반사

막의 두께가 d인 곳에서 반사빛 1, 2사이의 광학적경로차는 $2nd$이다. 그런데 파동이 성긴 매질에서 밴 매질로 반사될 때 경계면에서 반파장손실이 일어나므로 빛이 첫 경계면에서 반사될 때 반파장손실이 일어난다.

이것을 고려하여 광학적경로차에서 $\frac{\lambda}{2}$를 덜어 계산한 빛행로차 $\Delta r = 2nd - \frac{\lambda}{2}$를 빛의 파장과 비교한다.

$\Delta r = k\lambda\ (k = 0,\ 1,\ 2,\ \cdots)$이면 두 반사빛이 간섭하여 극대로 되고 $\Delta r = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$이면 극소로 된다.

즉 $2nd - \frac{\lambda}{2} = k\lambda$의 조건을 만족시키는 d는 간섭의 극대가 되는 막의 두께이며

$2nd-\frac{\lambda}{2}=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$의 조건을 만족시키는 d는 간섭의 극소가 되는 막의 두께이다.

$$d_{극대}=(k+\frac{1}{2})\frac{\lambda}{2n} \quad \text{극대가 되는 막의 두께}$$
$$d_{극소}=(k+1)\frac{\lambda}{2n} \quad \text{극소가 되는 막의 두께} \qquad (1)$$
$$(k=0,\ 1,\ 2,\ 3,\cdots)$$

두께가 고르로운 막은 우의 조건에 따라 극대조건을 만족시키면 막에 들여보낸 빛의 색갈을 띠며 극소조건을 만족시키면 막이 전반적으로 어두워지며 아무런 색갈도 띠지 않는다.

두께가 고르지 않은 막에서는 극대, 극소조건에 따라 밝은 띠와 어두운 띠가 번갈아놓이는 간섭무늬가 생긴다.

이러한 막(비누물막)에 흰색빛이 입사하면 막에는 고운 색무늬가 나타난다.

같은두께간섭무늬

두께가 고르지 않은 막에서 두께가 같은 자리들은 어떤 선을 이룬다. 이런 선에는 간섭의 극대나 극소점들이 놓여있어서 밝은 띠와 어두운 띠가 생긴다.

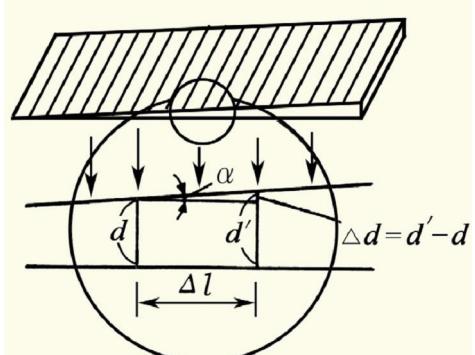
두께가 고르지 않은 막에 빛이 입사할 때 두께가 같은 점들로 이루어진 선을 따라 간섭의 극대와 극소점들이 분포되여 생긴 간섭무늬를 **같은두께간섭무늬**라고 부른다.

지도에 그은 등고선이 지대의 높이분포를 보여주듯이 같은두께간섭무늬는 막의 두께분포를 보여준다.

식 1에서 보는바와 같이 k가 같아도 파장 λ가 다르면 두께가 다른 자리에 극대가 생긴다. 그러므로 여러가지 파장의 빛이 섞인 흰색빛으로 엷은 막을 비출 때 생기는 간섭무늬는 여러가지 색을 띤다. 비누물막이나 기름막의 색무늬는 이것으로 설명된다.

그림 2-8. 쐐기막에서 무늬사이 간격

그림 2-8에서 보는바와 같이 작은 각으로 경사지어있는 얇은 쐐기막의 웃면에 수직으로 단색평행빛이 입사한다고 하자.

여기서 띠사이 간격(극대와 극대사이 간격)은 임의의 이웃한 두 극대들에 해당한 두께차가

$$\Delta d=\left(k+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2n}-\left[(k-1)+\frac{1}{2}\right]\frac{\lambda}{2n}=\frac{\lambda}{2n} \qquad (2)$$

이므로

$$\Delta\ell \approx \frac{\Delta d}{\alpha} = \frac{\lambda}{2n\alpha} \quad (3)$$

와 같다.

여기서 α는 쐐기막의 두 면사이의 각이다. 식 3에서 보는것처럼 임의의 이웃한 두 극대들사이의 거리는 차수에 관계되지 않는다.

그러므로 간섭무늬는 같은 간격으로 된 평행직선띠들로 나타난다. 식에서 보는 바와 같이 이웃한 극대사이 거리가 각 α에 거꿀비례하므로 뚜렷한 간섭무늬를 얻자면 두 면사이의 각이 될수록 작아야 한다.

⚠ 간섭무늬가 잘 나타나자면 될수록 막이 얇고 막의 두 면사이의 각이 작아야 한다.

뉴톤고리

같은두께간섭무늬는 실험실조건에서 쉽게 실현할수 있다.

그 실례로 뉴톤고리를 들수 있다.

평행평면유리판우에 구면반경이 큰 평면볼록렌즈를 볼록면이 아래로 향하게 올려놓고 빛을 수직으로 내려비출 때 생기는 동심원모양의 간섭무늬를 **뉴톤고리**라고 부른다.(그림 2-9)

그림 2-9. 뉴톤고리

뉴톤고리는 유리판과 렌즈사이의 얇은 공기막에 의하여 나타나는 같은두께간섭무늬이다.

❓ 뉴톤고리에서 극대고리의 반경은 무엇에 관계되는가.

그림 2-10에서 유리판과 렌즈사이의 공기막은 접촉점(중심) B둘레에서 원을 따라 같은 두께를 가진다. 또 중심으로부터 멀어질수록 두께가 급격히 커지므로 기슭으로 가면서 간섭무늬도 배여진다. 뉴톤고리의 반경을 구하여보자.

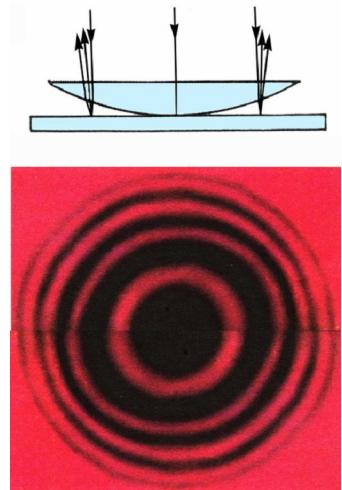
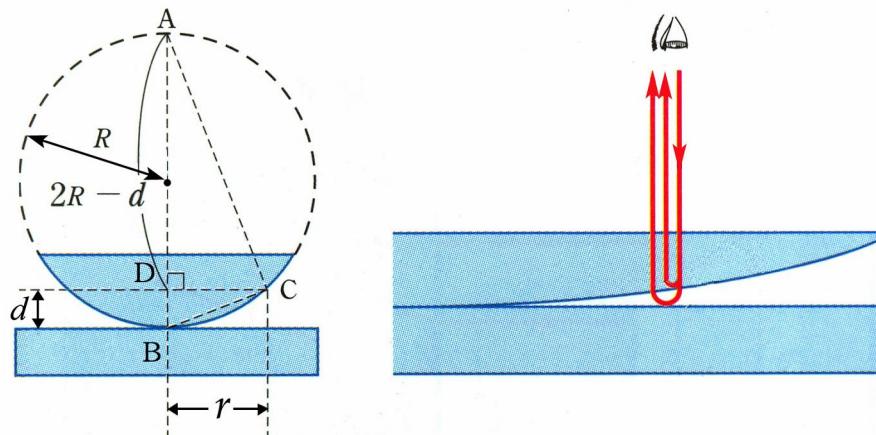



그림 2-10. 뉴톤고리의 반경

렌즈의 구면반경 R, 점 C에서 공기층의 두께 d, 점 D에서 점 C까지의 반경을 r라고 하면 △ADC ∽ △BCD이므로

$$r:(2R-d)=d:r$$

$$r^2=d(2R-d)\approx 2dR \quad (d^2 : \text{무시})$$

따라서 광학적경로차는 $2nd=2d=\dfrac{r^2}{R}$ (공기일 때 $n\approx 1$)

그런데 공기막의 두번째 경계면에서 반파장손실이 일어나므로 파장이 λ인 빛에 대하여 극대조건은 다음과 같다.

$$\frac{r^2}{R}+\frac{\lambda}{2}=k\lambda$$

$$\frac{r^2}{R}=\left(k-\frac{1}{2}\right)\lambda$$

이로부터 구면반경이 R인 렌즈에서 파장이 λ인 빛에 대하여 뉴톤고리는 k에 따라 다음과 같다.

$$r=\sqrt{\left(k-\frac{1}{2}\right)R\lambda} \quad \textbf{뉴톤고리의 반경} \qquad (4)$$

뉴톤고리는 차수 k가 같아도 파장이 길수록 반경이 커진다.

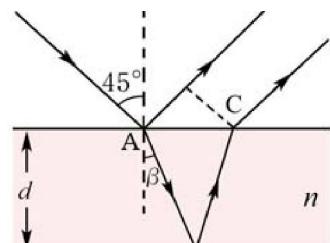
더우기 렌즈의 구면반경 R가 크면 고리사이 간격이 커서 뉴톤고리가 더 잘 관측된다. R가 크다는것은 공기막의 두께가 얇다는것이다.

만일 렌즈와 유리면사이가 공기막이 아니라 굴절률이 n인 다른 물질로 차있다면 뉴톤고리의 반경은 $r=\sqrt{\left(k-\dfrac{1}{2}\right)\dfrac{R\lambda}{n}}$ 로 표시된다.

문 제

1. 다음의 물음에 대답하여라.
   ㄱ) 얇은 막에서의 극대, 극소조건에서 반파장손실을 언제나 고려해야 하는가?
   ㄴ) 비누물막의 간섭무늬가 아래로 내려가면서 간격이 좁아지는것은 무엇때문인가?
2. 두께가 고르로운 얇은 막에 입사각 45°로 흰빛을 입사시켰더니 막이 붉은색으로 보인다. 막의 굴절률은 $\sqrt{2}$, 붉은색빛의 파장은 760nm이다. 막의 최소두께를 구하여라.(그림 2-11)

그림 2-11

3. 쐐기형막(α=18″)에 620nm의 빛을 수직으로 비치면 평행직선띠모양의 간섭무늬가 나타난다. 막의 굴절률이 1.4라면 무늬에서 밝은 띠사이 간격은 얼마인가?

제 3 절. 빛의 간섭의 리용

위대한 수령 **김일성**대원수님께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《제품의 질을 높이기 위하여서는 엄격한 규격제도를 세우고 검사제도를 강화하여야 하며 규격에 맞지 않는 제품을 없애기 위하여 투쟁하여야 합니다.》

간섭현상은 정밀가공제품의 질을 정확히 측정검사하며 광학기구의 질을 높이는데 리용되고있다.

정밀가공겉면의 질검사

정밀가공겉면의 질검사는 그림 2-12와 같은 장치로 한다.

그림에서 AB는 정결도가 매우 높은 평판이다.

AB우에 겉면의 질을 검사하려는 제품 A′B′를 올려놓되 그사이(AB와 A′B′)에 얇은 쐐기형공기층이 형성되도록 한다.

광원 S에서 나온 빛은 반투명거울 CC′에서 반사한 다음 렌즈 L에 의하여 평행빛으로 되여 쐐기형공기층의 웃면에 입사한다.

그림 2-12. 정밀가공겉면의 질검사원리

쐐기형공기층의 웃면과 아래면에서 반사되여 나오는 빛들은 간섭하여 비춤판 F에 같은두께간섭무늬를 만든다.

검사하려는 제품의 겉면이 정결도가 높아 리상적인 평면이라면 간섭무늬는 정확히 평행인 직선띠(그림 2-13의 ㄱ)들로 될것이다. 그러나 겉면이 불균일하다면 간섭무늬들은 이지러진다.(그림 2-13의 ㄴ, ㄷ)

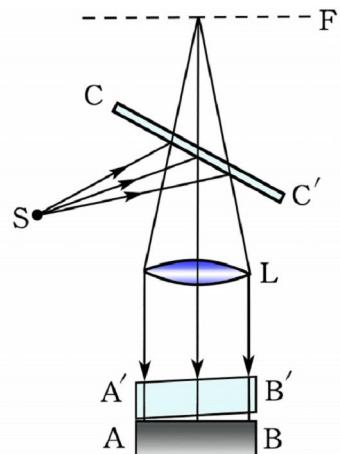
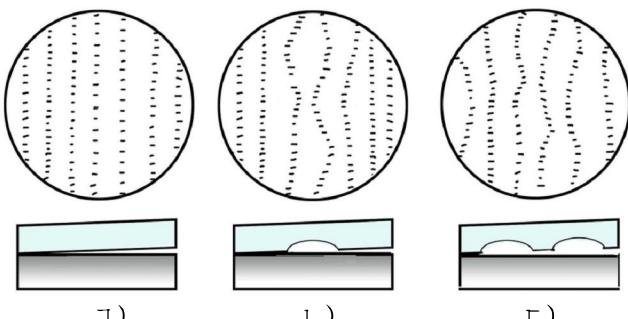



그림 2-13. 쐐기형공기층에 의한 간섭무늬

미소길이변화측정

열팽창에 의한 물체길이의 미소변화를 측정하는 실례를 보자.

열팽창결수가 정확히 알려져있는 재료로 만든 원기둥모양의 통안에 매끈한 결정시편 T를 놓고 이 통의 웃면에 표준평판유리 P를 올려놓는다.(그림 2-14)

결정시편의 웃면을 약간 경사지게 갈고 시편의 웃면과 표준평판유리 P사이에 얇은 쐐기형공기층이 형성되도록 조절한다.

광원 S에서 나온 빛은 이 공기층의 아래, 웃면에서 반사되여나와 간섭한다.

간섭무늬는 E방향에서 공기층에 맞춘 현미경으로 관찰한다.

시편을 가열하기 전에 공기층의 두께가 d_1인 곳에 k번째 극대가 생겼다고 하자. 그러면 극대조건

$$\Delta r = 2nd_1 + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

그림 2-14. 물질의 열팽창결수 측정원리

이 성립한다.(n은 공기층의 굴절률)

다음 시편을 가열하면 시편의 체적(높이)이 불어나므로 공기층의 두께도 얇아진다. 그리하여 공기층의 두께가 d_1로부터 조건

$$\Delta r' = 2nd_1' + \frac{\lambda}{2} = k'\lambda$$

을 만족하는 두께 d_1'로 되였을 때 k차 극대가 보이던 곳에 k'차 극대가 올것이다.

이때 공기층의 두께변화는

$$d_1 - d_1' = (k - k')\frac{\lambda}{2n}$$

로 된다.

그러므로 현미경을 통하여 이동하는 무늬의 수$(k-k')$를 세여 공기층의 두께변화를 알수 있으며 따라서 열팽창에 의하여 늘어난 시편의 미소길이변화도 측정할수 있다.

빛의 파장이 500nm정도이므로 무늬의 이동에 의하여 매우 작은 길이의 변화를 잴수 있다.

반사방지, 반사증대

현대적인 광학기구들에서는 여러개의 렌즈로 구성된 렌즈계를 리용한다. 실레로 사진기에는 3∼5개의, 현미경에는 5∼8개의 렌즈가 있다.

렌즈의 수가 많으면 겉면반사에 의한 손실이 매우 크기때문에 렌즈겉면에 얇은 막을 두께를 조절하여 입힘으로써 반사빛을 감소시키거나 없애버린다.

즉 렌즈면에서의 빛의 반사를 없애기 위하여 그림 2-15의 ㄱ와 같이 렌즈겉면에 얇은 막을 씌운다.

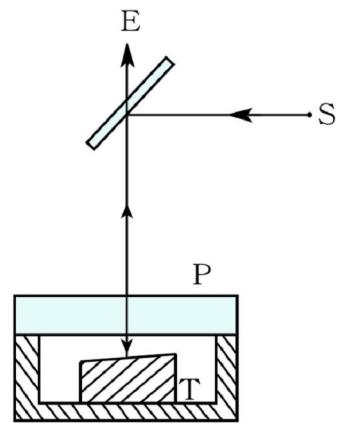
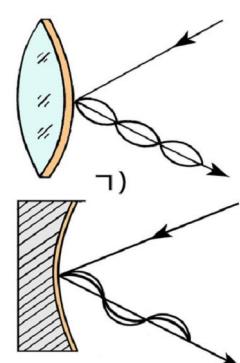



그림 2-15. 반사방지 및 반사증대

이 막의 두께를 적당히 선택하면 막의 웃면에서 반사된 빛선과 막의 아래면에서 반사되여나온 빛선이 중첩되여 반사빛선의 세기가 령으로 되여버린다.

실천에서는 또한 빛의 반사를 증대시켜 거울작용을 실현시켜야 할 필요도 제기된다. 이를 위해 유리의 겉면에 그보다 굴절률이 큰 막을 입힌다.

반사망원경의 반사거울에서는 그림 2-15의 ㄴ와 같이 반사면에 막을 씌우는데 두께를 적당히 조절하여 두 빛의 마루(또는 골)가 겹치도록 한다.

즉 반사된 빛선의 세기가 최대로 되게 한다.

빛원판에 정보기록

빛원판들은 기억용량과 기록방식에 따라 CD, VCD, DVD 등으로 나누어 부르지만 정보기록방식에서는 큰 차이가 없다.

이것을 CD(Compact Disk)로 실례를 들어보자. CD원판은 보호수지층우에 얇은 알루미니움박막(Al반사층)을 입히고 홈을 내주었다.(그림 2-16)

그림 2-16. 빛원판

그리고 홈을 보호하기 위하여 투명한 수지층을 또 입힌다.(그림 2-17)

그림 2-17. 빛원판의 구조

만일 Al반사층에 간섭의 극소조건을 만족하도록 홈을 만들어주면 반사빛세기는 거의나 령으로 된다.

따라서 홈이 있는 자리에서 반사된 빛을 0, 홈이 없는 자리에서 반사된 빛을 1의 신호로 빛검출기가 전기적신호로 넘길수 있다.

그러면 홈의 깊이를 대략 얼마로 하는가.

CD의 보호수지층의 굴절률은 1.5이고 레이자로서는 파장이 760nm인 붉은색반도체레이자가 쓰인다.

간섭의 극소조건 $2nd=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$로부터 홈의 깊이는 $d=(2k+1)\frac{\lambda}{4n}$와 같다.

$$k=0\text{인 경우}\qquad d=\frac{\lambda}{4n}=\frac{760\text{nm}}{4\times1.5}=126.6\text{nm}=0.126\mu\text{m}$$

빛원판에서도 홈들로 이루어진 자리길을 축음기의 레코드판에서처럼 라선모양으로 내준다.

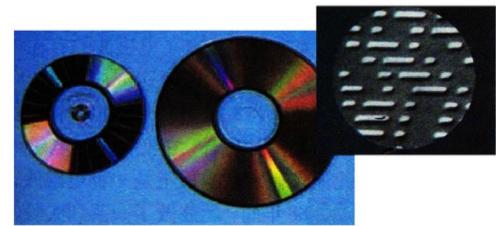
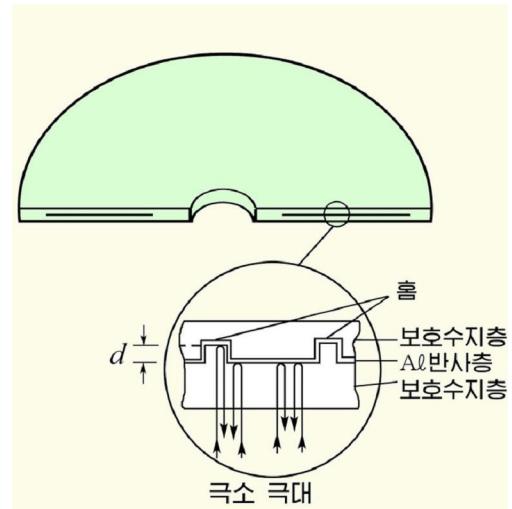



그림 2-18은 CD판에 기록된 홈자리길을 확대한 한 부분을 보여준다.

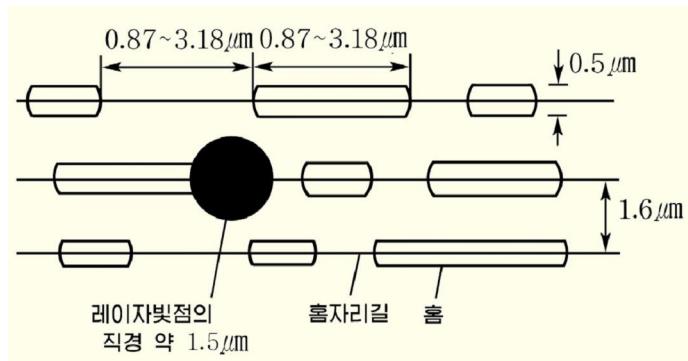



그림 2-18. 홈과 홈자리길

우리가 CD판을 볼 때 아름다운 무지개색을 띤것을 보게 되는것은 홈자리길들 사이의 반사면이 반사시킨 빛들이 서로 간섭한 결과이다.

CD판(직경 약 12cm)에서 홈자리길의 연장길이는 무려 5km정도이다.

※ 레이자와 기록방식을 갱신하여 기억용량을 크게 한 빛원판이 VCD, DVD 등이다.

문 제

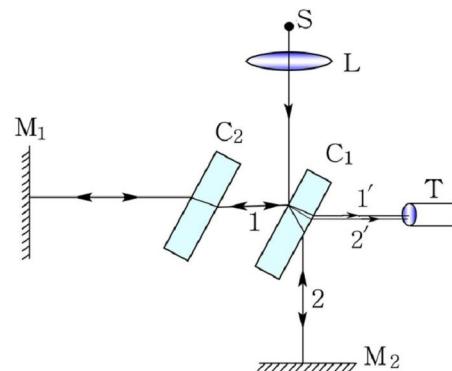
1. 그림 2-14의 장치로 알루미니움의 길이팽창결수를 재려고 한다. 0℃에서 높이가 3cm인 시료를 100℃까지 가열한 후 장치에 넣고 간섭무늬를 관측하니 처음보다 300개의 간섭무늬가 이동한것을 발견하였다. 리용한 빛의 파장이 500nm라면 알루미니움의 길이팽창결수는 얼마인가?

자료 — 간 섭 계

간섭현상을 리용하자면 그에 해당한 장치가 있어야 한다. 일반적으로 간섭현상을 여러가지 목적에 효과적으로 리용할수 있게 만든 장치를 **간섭계**라고 부른다. 간섭계에는 구조와 리용목적에 따라 마이켈손간섭계, 제만간섭계 등 여러가지가 있다.

그림 2-19에 대표적인 간섭계의 하나인 마이켈손간섭계를 주었다. 여기서 M_1, M_2은 평면반사거울, C_1는 반투명거울, C_2은 C_1에 평행인 평행투명판, T는 망원경이다. 광원 S에서 나온 단색빛은 렌즈 L에 의하여 평행빛으로 되여 C_1에 45^o의 각으로 들어가며 이 빛선은 두 갈래로 갈라져 M_1, M_2에 의하여 반사된다.

그림 2-19. 마이켈손간섭계

이 반사된 빛들이 망원경 T로 들어간다. 그리하여 두 빛 1, 2가 간섭하여 간섭무늬가 관측된다.

2. 실천에서는 반사거울의 겉면에 막을 입혀 반사효률을 높인다. 굴절률이 n인 유리로 된 거울겉면에 굴절률이 $n_{막}$($n_{막}>n$)인 막을 입혔을 때 반사빛을 최대로 하기 위하여서는 막의 두께가 최소한 얼마여야 하는가? 반사빛의 파장은 λ이다.
3. 굴절률이 n인 렌즈에 굴절률이 $n_{막}$($n>n_{막}$)인 얇은 막을 최소한 얼마의 두께로 입혀야 반사빛을 없앨수 있겠는가?(그림 2-20)

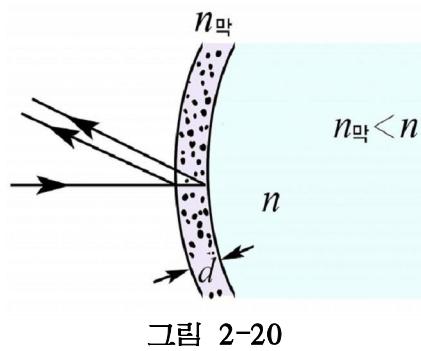



그림 2-20

제 4 절. 빛의 에돌이

한개 실틈에 의한 빛의 에돌이

밤에 멀리에 있는 가로등을 눈을 쪼프리고 보면 어떻게 보이는가.

빛이 파동이라면 간섭현상뿐아니라 에돌이현상도 나타날것이다.

실 험

○ 검은 종이에 면도칼로 실틈을 따내고 가열선조가 직선인 광원을 실틈에 평행되게 놓고 광원을 본다.(그림 2-21의 ㄱ)

○ 연필 두자루를 맞쥐여 실틈이 생기게 하고 이 실틈을 거쳐 형광등을 본다. 연필을 꽉 쥐였다놓았다하면서 실틈의 너비를 변화시켜본다.(그림 2-21의 ㄴ)

형광등은 퍼져보이고 그 주위에 약간 밝은 띠들이 여러개 보인다.

○ 실틈판과 비춤판을 평행으로 세우고 레이자빛을 실틈에 비춘다. 비춤판중심에 밝은 점이 나타나고 그 량쪽에 이보다 약간 어두운 점들이 나타난다.(그림 2-22의 ㄱ)

그림 2-21. 실틈을 거쳐 광원을 본다

실험은 빛이 실틈을 지날 때 에돌아서 실틈에 들어오는 빛이 다른 방향으로도 퍼져나간다는것을 보여준다.

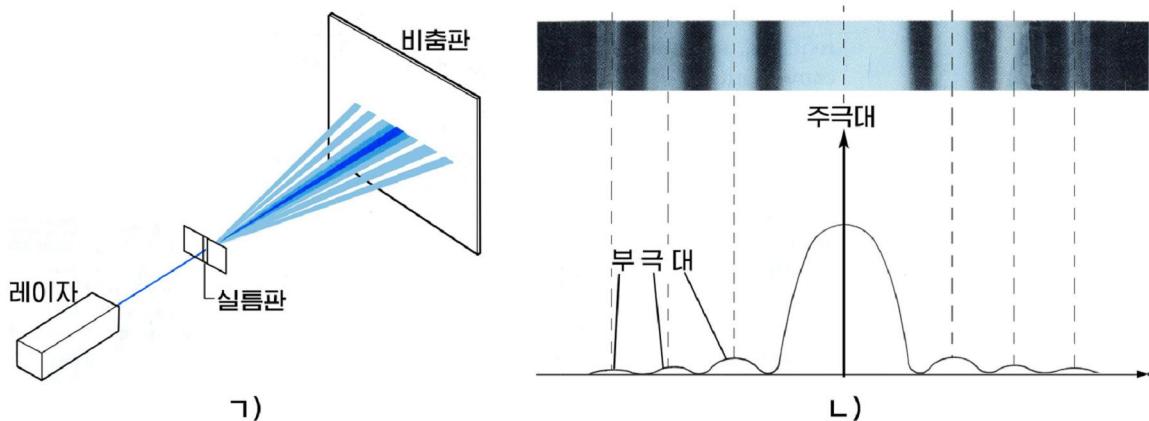



그림 2-22. 레이자빛의 에돌이무늬

빛이 전파되다가 실틈이나 장애물기슭에서 그 일부가 전파방향을 바꾸어 에돌아나가는 현상을 **빛의 에돌이**라고 부른다.

빛의 에돌이에 의하여 생기는 무늬를 **에돌이무늬**라고 부르며 가운데의 밝고 넓은 띠를 **주극대** 또는 **0차극대**, 좌우의 약간 밝은 띠들을 **부극대**라고 부른다.(그림 2-22의 ㄴ)

실험에 의하면 실틈이 좁을수록 에돌이무늬는 더 퍼지고 실틈이 넓을수록 에돌이무늬가 좁아지다가 나중에는 광원이 똑똑히 보인다.(그림 2-23)

그림 2-23. 실틈의 너비에 따르는 에돌이무늬

빛의 에돌이는 장애물이나 틈의 너비가 빛의 파장정도로 매우 작을 때 잘 나타난다.

에돌이무늬는 어떻게 나타나는가.

너비가 a인 실틈에 파장이 λ인 빛이 수직으로 들어오면 틈안의 모든 점은 한개 파면우의 점들로서 같은자리각으로 떠는 요소파원이 된다.

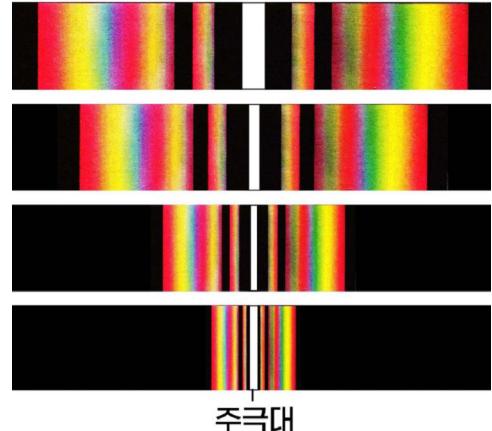
틈을 곧추 지나가는 빛의 방향과 각 φ를 이루는 방향으로 나가는 2차파들은 그 방향에서 중첩하여 지워질수도 있고 지워지지 않을수도 있다.

즉 간섭한다.

이렇게 에돌이무늬는 요소파들이 중첩되여 이루어진 간섭무늬라고 말할수 있다.

이러한 에돌이무늬의 설명은 후이겐스-프레넬의 원리에 기초하고있다.

프랑스의 물리학자 프레넬은 1812년에 후이겐스의 원리에 파동의 간섭을 더 보충하여 에돌이파의 전파방향뿐아니라 그의 세기분포도 설명할수 있는 다음의 원리를 제기하였다.

첫째로, 파면우의 모든 점은 동일한 간섭성요소파원이다.

둘째로, 파면밖의 어떤 점에서의 파동은 파면우의 모든 간섭성요소파원으로부터 나온 요소파들의 중첩의 결과로 이루어진다.

이상의 내용을 **후이겐스-프레넬의 원리** 또는 **요소파간섭의 원리**라고 부른다.

틈 a를 너비가 같은 띠들로 나누되 린접한 두 띠에서 나오는 2차파들의 경로차가 $\frac{\lambda}{2}$씩 되게 하자. 이런 띠들을 **$\frac{\lambda}{2}$띠(프레넬띠)**라고 부른다. 그러면 린접한 띠에서 θ방향으로 나가는 2차파들은 자리각이 정반대여서 중첩되여 서로 지워진다.(그림 2-24)

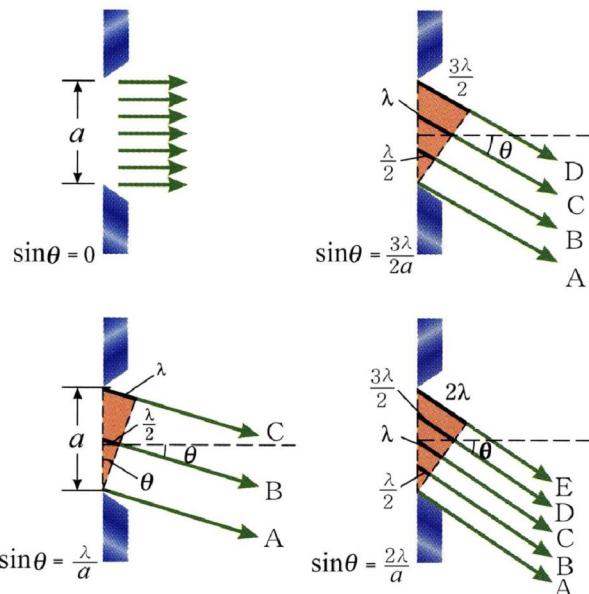



그림 2-24. 요소파들의 간섭

프레넬띠

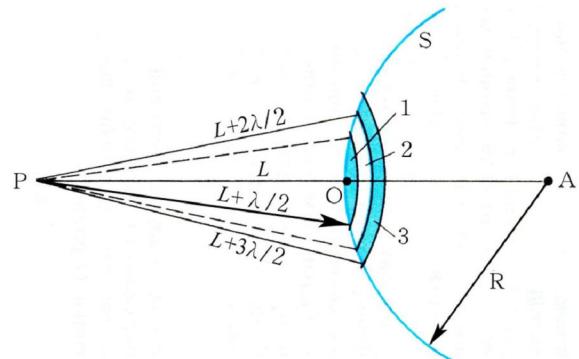
후이겐스-프레넬의 원리를 에돌이를 비롯한 여러 문제에 적용할 때에는 먼저 주어진 파면을 나누게 된다.

프레넬은 후이겐스-프레넬의 원리를 내놓으면서 파면을 나누는 기묘한 방법을 제기하였다.

어떤 순간 점파원 A가 주는 파면(구면)의 어떤 구간 S를 생각하자.

파면밖의 어떤 점 P와 A를 잇고 OP=L이라고 하자. 다음 길이

그림 2-25. 프레넬띠

$L+\frac{\lambda}{2}$, $L+2\cdot\frac{\lambda}{2}$, $L+3\cdot\frac{\lambda}{2}$, ⋯, $L+\mathrm{n}\cdot\frac{\lambda}{2}$를 반경으로 하여 점 P에서 원을 그려 파면을 고리모양의 띠로 나눈다. 그러면 중심부분으로부터 고리띠의 번호를 붙여갈 때 띠의 번호가 커짐에 따라 매개 띠의 경계로부터 P점까지의 거리가 $\frac{\lambda}{2}$만큼씩 증가한다. 이렇게 나뉘여진 띠를 **프레넬띠**라고 부른다. 매개 린접한 두 프레넬띠들로부터 점 P에 오는 요소파들은 $\frac{\lambda}{2}$만 한 경로차를 가진다. 다시말하여 린접한 두 프레넬띠들은 점 P에 자리각이 π만큼 차이나는 진동을 일으킨다.

그리하여 짝수개의 $\frac{\lambda}{2}$띠로부터 나온 2차파들은 다 지워지고 나머지 쌍을 이루지 못한 띠에서 나온 2차파만 남아서 주어진 방향에서의 에돌이무늬를 이룬다.

틈의 량기슭에서 θ방향으로 나가는 2차파들의 경로차가 $\Delta r = a\sin\theta = k\lambda$ (k 는 옹근수)이면 틈에는 짝수개의 $\frac{\lambda}{2}$띠가 있어서 θ방향으로 나가는 빛이 거의 없어지고 극소를 이룬다.

경로차가 $\Delta r = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$이면 틈에는 홀수개의 $\frac{\lambda}{2}$띠가 있어서 짝을 이루지 못한 한개 띠로부터 나가는 2차파가 그 방향에서의 극대로 된다.

그러므로 에돌이극대와 극소를 이루는 각들은 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$\sin\theta_{극대} = (2k+1)\frac{\lambda}{2a} \qquad \text{한개 실틈에서 에돌이극대방향}$$

$$\sin\theta_{극소} = k\cdot\frac{\lambda}{a} \qquad \text{한개 실틈에서 에돌이극소방향}$$

$$(k = \pm 1,\ \pm 2,\ \cdots)$$

$\theta = 0$인 방향에서는 주극대가 된다.

구멍에 의한 빛의 에돌이

실 험

○ 검은 종이에 뚫은 바늘구멍을 거쳐 작은 전등을 본다.

○ 직경이 다른 구멍들로 같은 실험을 한다.(그림 2-26) 전등이 퍼져보이고 그 둘레에 밝고 어두운 고리들로 이루어진 무늬가 보인다. 이것이 원형구멍에 의한 빛의 에돌이무늬이다.

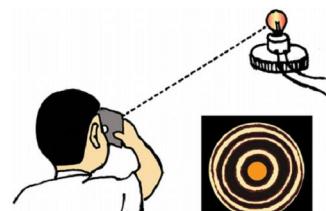



그림 2-26. 작은 구멍에 의한 빛의 에돌이

구멍이 작을수록 에돌이가 심해지며 구멍이 클수록 에도는 빛이 약해지고 곧추가는 빛이 세진다. 구멍이 완전히 열리면 빛이 막히지 않아 에돌지 않고 곧추 간다.

광학기구들에는 조임들이 있고 렌즈들도 크기가 제한되여있기때문에 빛의 에돌이가 일어난다. 광학기구에서 렌즈의 테두리는 원형구멍과 같은 작용을 하므로 에돌이를 일으키여 실제 영상의 크기는 에돌이에 의한 중심극대의 크기와 같다.

이때문에 점의 영상은 점으로 되지 않고 약간 퍼진 에돌이무늬로 된다.(그림 2-27)

물체안의 가까운 두 부분은 그 영상인 에돌이무늬들이 겹쳐서 갈라보기 힘들다.

광학현미경의 배률은 에돌이때문에 제한되여있으며 그것으로는 분자들을 갈라볼수 없다.

그림 2-27. 작은 구멍에 의한 붉은색빛과 풀색빛의 에돌이무늬

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 빛의 에돌이는 빛의 파동성을 보여주는 현상중의 하나이다.
   ㄴ) 양그의 간섭무늬와 한개 실틈에서 나온 빛의 에돌이무늬는 본질이 다르다.
   ㄷ) 빛의 파장이 길수록 에돌이각 φ가 더 크다.
   ㄹ) 틈의 너비가 넓을수록 에돌이무늬의 너비가 크다.
2. 파장이 693nm인 레이자빛으로 너비가 0.1mm인 틈을 비춘다. 틈으로부터 1m 뒤에 있는 비춤판에서 첫번째와 두번째 부극대들이 중심으로부터 얼마나 떨어져있는가?
3. 빠쏭의 빛점이 형성되는 원인을 설명하여라.

빠쏭의 빛점

수학자 빠쏭은 프레넬의 파동리론을 적용하여 원형가림판뒤에 생기는 어두운 그림자의 중심에 밝은 점이 나타나야 한다는 결과를 얻고 프레넬의 파동리론을 반박하였다.

실지 실험을 해보면 빠쏭의 리론적결과가 정확하다는것을 알수 있다.

이 밝은 점을 **빠쏭의 빛점**이라고 부른다.(그림 2-28)

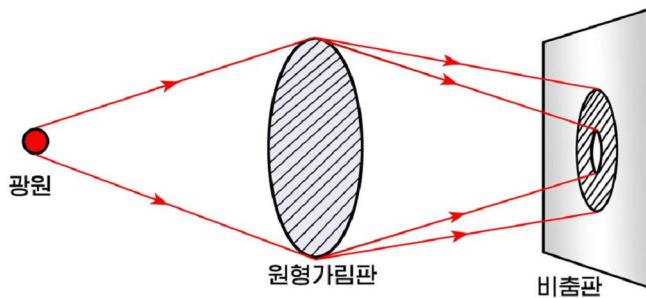



그림 2-28. 빠쏭의 빛점

제 5 절. 에돌이살창

에돌이살창에 의한 빛의 에돌이

실천에서는 하나의 틈보다도 수없이 많은 틈에 의한 에돌이무늬가 쓰인다.

그것은 많은 실틈에 의한 에돌이무늬가 더 밝고 뚜렷하기때문이다.

수많은 좁은 틈들을 일정한 사이를 두고 평행으로 배치한것을 **에돌이살창**이라고 부른다.(그림 2-29)

그림 2-29. 에돌이살창

에돌이살창은 살창상수로 특징짓는다. 틈의 너비를 a, 틈사이의 살창두께를 b라고 할 때 $d = a + b$를 **살창상수**라고 부른다.

에돌이살창을 통하여 빛이 들어오는 실틈을 보면 간섭무늬가 보이는데 이 밝은 띠들은 하나의 실틈이나 두개의 실틈(양그의 실험)에 의한 띠들보다 더 예리하고 밝다.(그림 2-30)

에돌이살창에서 밝은 띠가 생기는 자리는 어떻게 결정하는가.

그림 2-30. 에돌이살창을 통하여 실광원을 본다

파장이 λ인 단색평행빛이 살창상수가 d인 살창에 수직으로 입사한다고 하자.

매 틈에서는 사방으로 에돌이빛이 전파되는데 수많은 빛선가운데서 평행빛묶음들은 중첩되면서 간섭하여 극대와 극소조건에 따라 비춤판에 에돌이무늬를 이룬다.(그림 2-31)

그림 2-31. 에돌이살창에서 평행빛묶음

매 틈에서 나가는 요소파가 입사빛선의 전파방향에 대하여 각 θ를 이루는 방향으로 전파되는 평행빛묶음을 보자.(그림 2-32)

린접한 두 틈으로부터 에돌이하여 나가는 요소파들의 경로차는 $\Delta r = d\sin\theta$와 같다. 틈들에는 하나의 파면이 도달하므로 그 요소파원들은 진동수와 자리각이 꼭같다.

그러므로 Δr가 λ의 옹근수배이면 모든 틈에서 그 방향으로 나가는 요소파들은 일정한 자리각차를 가지며 중첩하면서 극대(밝은 띠)를 형성한다.

그러므로 에돌이살창에 의하여 간섭무늬에 밝은 띠가 나타날 조건은 다음과 같다.

$d\sin\theta = k\lambda$ 에돌이살창에서 극대조건
(k=0, ±1, ±2, ⋯)

그림 2-32. 에돌이살창에서 밝은 띠가 생기는 자리

에돌이살창에 의한 스펙트르

웃식을 보면 밝은 띠가 나타나는 방향들은 k가 일정한 조건에서 파장 λ에 따라 다르다.

파장이 길수록 에돌이가 더 심하게 나타나며 θ가 더 큰 방향에 밝은 띠가 나타난다. 즉 빛의 파장 λ가 클수록 에돌이각 θ가 크다.

여러가지 파장의 빛이 섞인 흰빛이 에돌이살창을 지나면 빛이 파장별로 갈라져서 에돌이무늬는 여러가지 색을 띤 스펙트르를 이룬다.(그림 2-33)

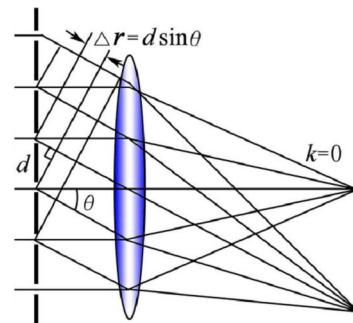
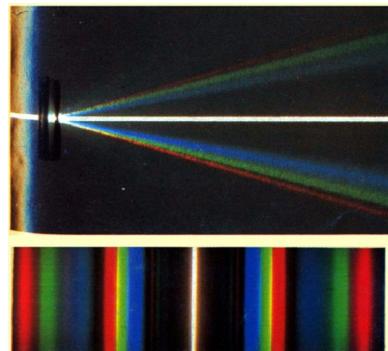



그림 2-33. 에돌이살창에 의한 흰빛의 에돌이와 스펙트르

실 험

◯ 여러가지 에돌이살창으로 전등(콤팍트등)과 태양을 관찰하여본다.(살창을 눈에 대고 본다.)

◯ 레이자로 에돌이살창을 비추면서 에돌이무늬를 관찰한다. 흰빛에 의해서는 여러가지 색무늬가 보이고 레이자빛의 에돌이무늬는 중심에 밝은 점과 량옆으로 가면서 약간 밝은 점들이 나타나 에돌이무늬를 이룬다.

참고 에돌이살창의 분산도와 분해능

에돌이살창의 성능을 특징짓는 기본특성량으로서 분산도(D)와 분해능(A)이 있다.

분산도는 어떤 주어진 차수의 스펙트르에서 파장에 따라 스펙트르선들이 갈라지는 정도를 특징짓는 량이다. 분해능은 스펙트르에서 최소로 얼마까지의 파장차를 가지는 두 스펙트르선을 구별할수 있는가를 특징짓는 량이다. 분산도와 분해능을 크게 하자면 실틈수가 많아야 한다. 지금 쓰이는 현대적인 살창(실례로 홀로그라피살창)은 1mm당 600~수천개의 실틈이 있다.

에돌이살창에 의한 빛의 스펙트르를 **에돌이스펙트르**라고 부른다.(그림 2-34) 에돌이살창을 스펙트르분석과 빛의 파장을 재는데 리용한다.

보임빛의 파장

색	파장 [nm]
붉은색빛	760~620
감색빛	620~590
누런색빛	590~560
풀색빛	560~510
푸른색빛	510~450
남색빛	450~430
보라색빛	430~380

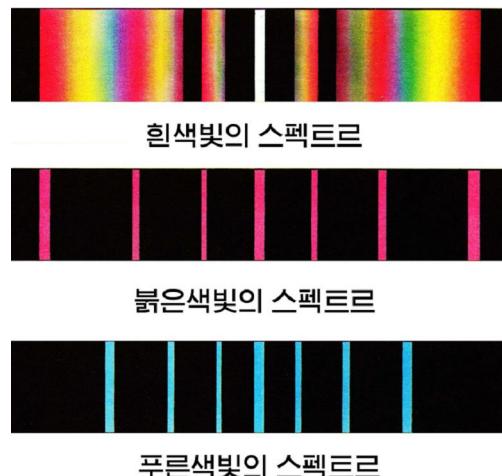



그림 2-34. 에돌이스펙트르

[례제] 2cm 너비에 8 000개의 틈이 있는 에돌이살창에 어떤 색의 단색빛을 수직으로 통과시켰더니 $\theta=26^\circ$ 방향에서 밝은 띠가 나타났다. 이 빛은 어떤 색의 빛인가?

풀이. 주어진것: $\ell=2\text{cm}$

$n=8\ 000$

$\theta=26^\circ$

구하는것: λ?

에돌이살창의 살창상수는 $d=\frac{\ell}{n}=\frac{2\times10^{-2}}{8\ 000}=2.5\times10^{-6}(\text{m})$

$\theta=26^\circ$ 방향에 극대가 생기는 빛의 파장

$$\lambda=\frac{1}{k}d\sin\theta=\frac{1}{k}\times2.5\times10^{-6}\times0.438=\frac{1}{k}\times1.1\times10^{-6}(\text{m})=\frac{1}{k}\times1\ 100(\text{nm})$$

이때 $k=1$ 이면 $\lambda_1=1\ 100\text{nm}$(적외선)

$k=2$ 이면 $\lambda_2=550\text{nm}$(풀색빛)

$k=3$ 이면 $\lambda_3=367\text{nm}$(자외선)

적외선과 자외선은 보이지 않으므로 26° 방향으로 에도는 빛은 풀색으로 보인다.

문 제

1. 머리빗은 살창모양을 이루고있으나 에돌이무늬를 만들지 못한다. 왜 그런가?
2. 3cm 너비에 18 720개의 틈이 있는 에돌이살창을 파장이 590nm인 빛(나트리움등빛)이 수직으로 지날 때 1차극대가 나타나는 에돌이각을 구하여라.
3. 파장이 546nm인 빛(수은등빛)을 에돌이살창에 수직으로 비추었더니 30° 방향에 2차극대가 생겼다. 이 에돌이살창의 1cm 너비에 몇개의 틈이 있는가?

제 6 절. 빛의 쏠림

빛의 간섭과 에돌이는 빛이 파동이라는것을 확증하여주지만 가로파인가, 세로파인가 하는것은 밝히지 못한다.

가로파와 세로파를 갈라보는 방법

일반적으로 가로파와 세로파는 진동방향과 전파방향이 같은가, 수직인가 하는 차이로 갈라낼수 있다.

세로파는 진동방향과 전파방향(파선)이 일치하므로 전파방향만 주어지면 진동방향은 하나뿐이다. 때문에 소리파와 같은(그림 2-35) 세로파가 퍼지는 길에 살창모양의 물체를 놓고 전파방향을 축으로 하여 돌려도 그것을 지나는 파동의 세기가 달라지지 않는다.

그림 2-35. 세로파의 파선과 진동방향

가로파는 진동방향과 전파방향이 서로 수직이며전파방향에 대하여 진동방향이 얼마든지 많다.(그림 2-36의 ㄱ)

이가운데서 어떤 한 방향(평면)에서만 진동하는 가로파가 있는데 이러한 가로파를 **쏠림된 가로파**라고 부른다.

쏠림된 가로파가 퍼지는 길에 살창을 놓고 전파방향둘레로 돌리면 그것을 지나는 파동의 세기가 세졌다약해졌다한다.(그림 2-36의 ㄴ)

이처럼 살창모양의 물체를 파선둘레에서 돌릴 때 그것을 지나는 파동의 세기가 변하면 그것은 쏠림된 가로파이고 그렇지 않으면(파동의 세기가 달라지지 않으면) 그 파동은 쏠림되지 않은 가로파이거나 세로파이다.

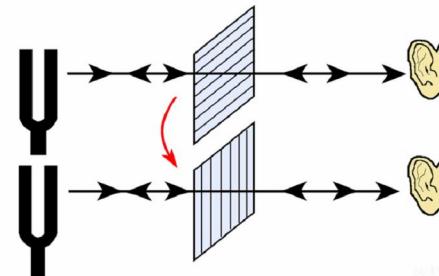
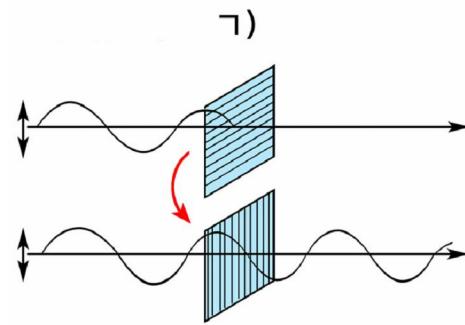
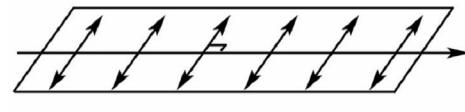
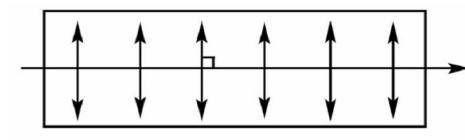



그림 2-36. 가로파의 파선과 진동방향

빛의 쏠림

빛은 가로파인가, 세로파인가.

○ 빛이 나가는 길우에 빛쏠림판 하나를 전파방향에 수직되게 설치하고 빛선 둘레에서 천천히 돌려보면서 비춤판에 떨어지는 빛의 밝기변화를 관찰한다.
빛의 밝기변화가 없다.

○ 다음 빛쏠림판 두개를 빛선방향에 각각 수직으로 배치하고 그중 비춤판쪽의 빛쏠림판을 천천히 돌리면서 비춤판에 떨어지는 빛의 밝기변화를 본다.
빛의 밝기변화가 있다.(그림 2-37)

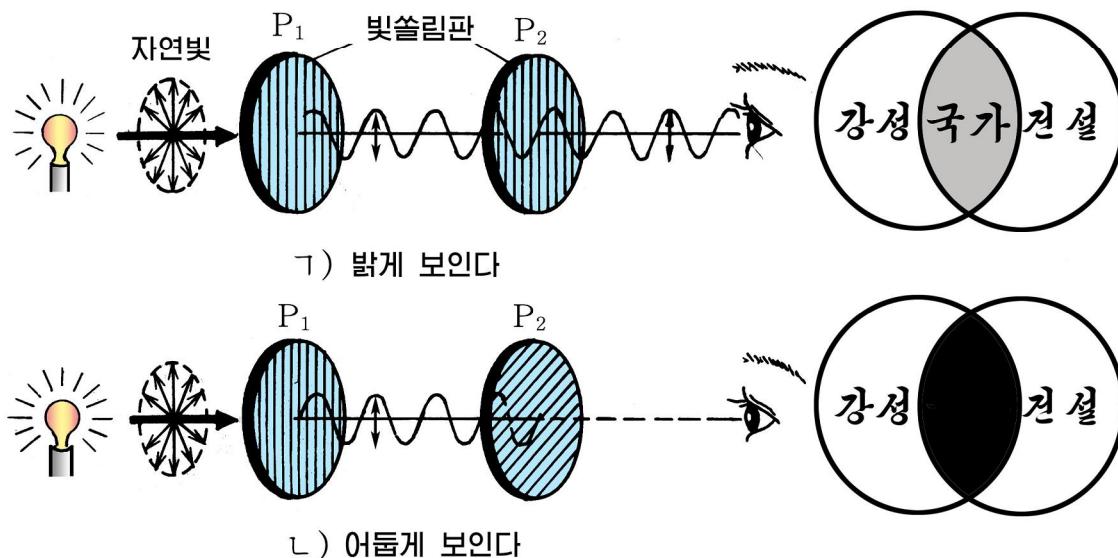



그림 2-37. 두 빛쏠림판을 통과한 빛의 세기

빛이 세로파라면 이러한 현상이 나타나지 않을것이다.
이로부터 빛은 가로파이다는것을 알수 있다.

빛쏠림판

빛쏠림판을 일명 **뽈랴로이드판**이라고도 부른다. 뽈랴로이드판은 폴리비닐알콜수지판을 요드용액에 잠그었다가 꺼내여 늘군 다음 말리워서 얻는다. 빛쏠림판에는 뽈랴로이드축이라는 축이 있는데 이 축에 평행으로 진동하는 빛은 흡수되고 이 축에 수직으로 진동하는 빛은 통과된다. 빛쏠림판은 바로 뽈랴로이드축에 수직으로 진동하는 빛만 통과시킨다. 빛쏠림판은 대체로 한방향으로 나란히 배렬된 살창으로 리해해도 된다. 물론 틈사이 간격은 nm정도로 매우 작다. 뽈랴로이드축에 수직인 면 즉 잘 통과시키는 빛의 진동방향으로 이루어진 면을 **주평면**이라고 부른다.

그렇다면 빛은 어떤 가로파인가.

한개의 빛쏠림판으로 실험할 때 빛의 밝기변화가 없다는것은 보통 광원에서 나오는 빛이 전파방향에 대하여 진동방향이 무수히 많은 가로파 즉 쏠림되지 않은 가로파라는것을 의미한다.

흔히 쓰는 광원의 빛이나 태양빛은 수많은 원자, 분자들이 제각기 다른 방향에서 진동하는 빛파동이다.

이러한 빛은 각이한(무수히 많은) 방향에서 진동하는 쏠림되지 않은 가로파이다.

전파방향에 수직인 면에서 모든 방향으로 꼭같은 진폭(세기)으로 진동하는 빛을 **자연빛**이라고 부른다.(그림 2-38의 ㄱ)

그림 2-38. 여러가지 쏠림빛들

자연빛은 하나의 빛쏠림판을 지나면서 쏠림되고 빛선방향을 축으로 하여 돌아가는 다른 빛쏠림판에 의하여 밝기(세기)가 변화된다.

쏠림된 가로파로서의 빛을 **쏠림빛**이라고 부르며 자연빛이 쏠림빛으로 되는것을 **빛의 쏠림**이라고 부른다. 전파방향에 수직인 면에서 빛이 어느 한 방향으로만 진동한다면 빛이 그 방향으로 쏠렸다고 말하며 이런 빛을 **완전쏠림빛**이라고 부른다.(그림 2-38의 ㄴ)

전파방향에 수직인 면에서 방향에 따라 진폭이 서로 다른 빛을 **부분쏠림빛**이라고 부른다.(그림 2-38의 ㄷ)

빛쏠림판은 주평면이라는 특징적인 방향을 가지고있는데 그 방향에서 진동하는 빛만 통과시킨다.

두 빛쏠림판의 주평면이 평행으로 놓이면 빛이 잘 통과되고 주평면이 수직으로 놓이면 빛은 통과되지 못한다.(그림 2-39)

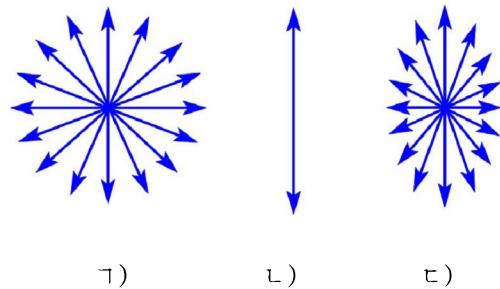
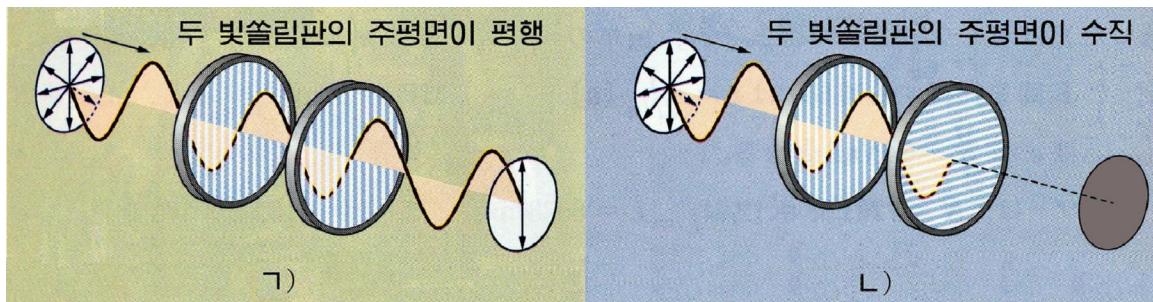



그림 2-39. 두 빛쏠림판의 배치에 따르는 빛의 전파

반사하는 빛의 쏠림

일반적으로 반사빛은 쏠림빛이다.

○ 빛쏠림판 하나를 눈앞에 대고 그것을 거쳐 전등이나 밖을 내다보면서 빛쏠림판을 돌려본다.

○ 빛쏠림판을 거쳐 유리나 책상면에서 반사되는 빛을 보면서 빛쏠림판을 돌려본다. 전등을 볼 때에는 밝기변화가 나타나지 않고 반사빛을 볼 때에는 밝기변화가 나타난다.(그림 2-40)

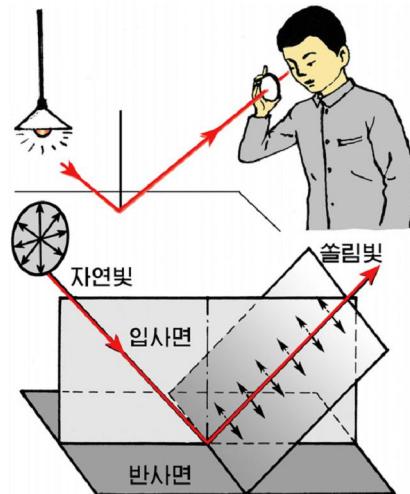
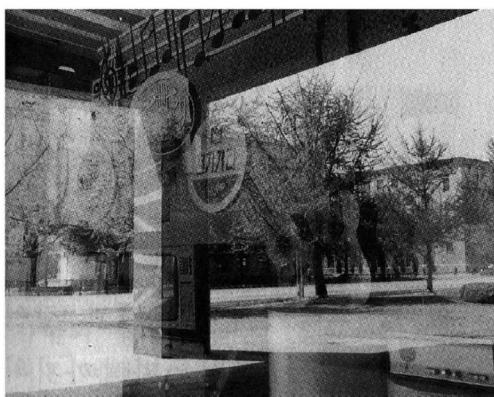



그림 2-40. 반사빛의 쏠림

실험으로부터 반사빛은 쏠림빛이다는것을 알수 있다.

유리나 락카와 같은 유전체걸면에 자연빛이 떨어지면 입사면우에서 떠는 빛은 잘 반사되지 않고 입사면에 수직으로 떠는 빛이 잘 반사된다. 그러므로 반사빛속에는 입사면에 수직으로 떠는 쏠림빛이 많아진다.

특히 굴절률이 n인 매질에서 반사될 때 입사각이 다음 식을 만족할 때에는 입사면에 수직으로 떠는 완전쏠림빛만 반사된다.

$$\tan \alpha_{브} = n$$

여기서 입사각 $\alpha_{브}$를 **브류스터각**이라고 부른다.

반사빛의 쏠림현상은 유리창안이나 물속에 있는 물체를 보거나 사진찍을 때 반사빛이 방해하는것을 막는데 쓴다.(그림 2-41)

빛이 진공속에서도 퍼지며 그 속도가 전자기파의 속도와 같다는것과 함께 가로파라는 사실은 빛이 전자기파라는것을 밝히는 중요한 증거로 된다.

ㄱ) 보통사진

ㄴ) 빛쏠림판을 써서 찍은 사진

그림 2-41. 빛쏠림판을 리용하여 찍은 사진

문 제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 파동의 전파방향에 어떤 물체를 놓고 돌릴 때 파동의 세기가 변하면 반드시 가로파이다.
   ㄴ) 자연빛은 하나의 빛쏠림판을 지나면서 반드시 쏠림빛으로 된다.
   ㄷ) 반사빛은 반드시 입사면에 수직으로 떠는 쏠림빛이다.
   ㄹ) 자연빛을 쏠림빛으로 전환시키자면 반드시 빛쏠림판을 두개 써야 한다.
2. 사진기렌즈앞에 빛쏠림판을 어떻게 놓아야 유리면에서 반사되여나오는 빛이 렌즈에 들어오지 못하겠는가?
3. 굴절률이 1.5인 유리와 굴절률이 1.33인 물에 대한 브류스터각을 구하여라.

제 7 절. 빛의 분산

빛의 분산

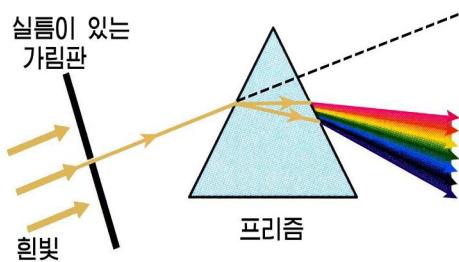
빛스펙트르를 얻는데는 에돌이살창과 함께 프리즘을 쓴다.

해빛을 프리즘으로 지나보내면 무지개처럼 아름다운 색빛들로 갈라지는데 파장이 긴 붉은색빛은 제일 약하게 굴절되고 파장이 짧은 보라색빛은 제일 세게 굴절된다.(그림 2-42)

그림 2-42. 프리즘에 의한 빛의 분산

파장이 서로 다른 빛들의 모임인 해빛이 프리즘을 통과할 때 여러가지 색빛으로 갈라지는것은 빛의 파장에 따라 굴절각이 다르며 따라서 물질의 굴절률이 빛의 파장에 따라 다르다는것을 말해준다.

물질의 굴절률이 빛의 파장에 따라 달라서 빛이 파장별로 갈라지는 현상을 **빛의 분산**이라고 부른다.

투명한 물질의 굴절률은 빛의 파장이 길수록 작다. 실험에 의하면 굴절률은 빛의 파장과 다음의 관계가 있다.

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$ **빛의 파장과 굴절률사이관계**

여기서 A와 B는 물질의 종류에 따르는 상수이다.

빛을 파장별로 갈라서 스펙트르를 얻는데 쓰는 광학기구를 **분광기**라고 부른다.

분광기의 기본부분은 실틈 S, 입사렌즈 L_1, 프리즘(또는 에돌이살창) P, 출사렌즈 L_2로 되여있다. 실틈 S로 들어온 빛은 렌즈 L_1, L_2, 프리즘 P에 의하여 분산되여 면 F에 스펙트르가 나타난다.

교육용분광기처럼 스펙트르를 눈으로 보게 된 분광기에는 대안렌즈가 설치되여 있으며 스펙트르사진을 찍는 분광사진기에는 면 F에 사진건판을 설치하는 장치가 있다.(그림 2-43)

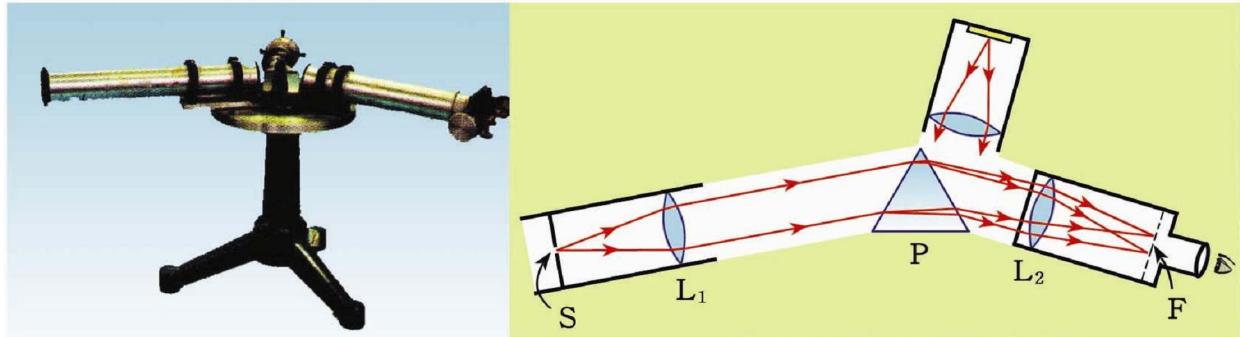



그림 2-43. 분광기

빛의 스펙트르

빛의 스펙트르에는 복사스펙트르와 흡수스펙트르가 있는데 모양은 여러가지이다.

광원에서 나온 빛을 분광기의 실틈에 넣어 얻은 스펙트르를 **복사(발광)스펙트르**라고 부른다.

복사스펙트르에는 련속스펙트르, 선스펙트르, 띠스펙트르가 있다.

가열된 고체는 넓은 파장구역에 속하는 모든 빛을 다 낸다. 이러한 빛의 스펙트르는 련속적으로 분포된 넓은 색띠로 되는데 이것을 **련속스펙트르**라고 부른다.(그림 2-44의 ㄱ)

기체방전등에서 나오는 빛에는 몇개 파장의 빛들만 들어있으며 스펙트르는 띠염띠염 떨어진 선들로 되여있다. 이것을 **선스펙트르**라고 부른다.(그림 2-44의 ㄴ, ㄷ, ㄹ)

방전등속의 기체의 압력이

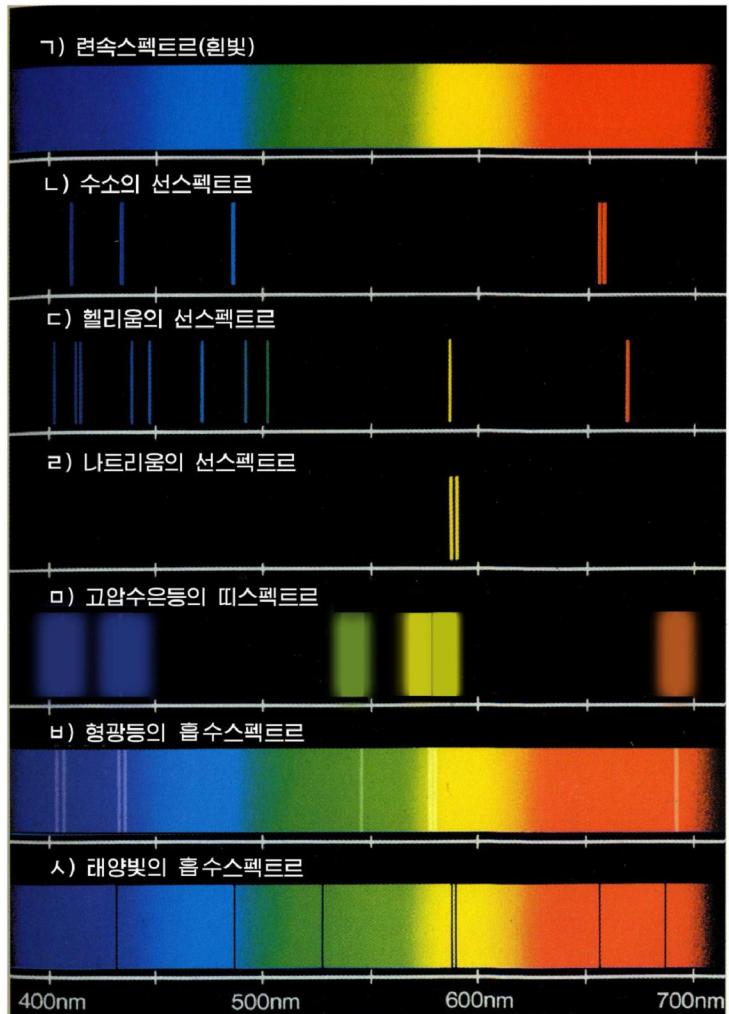



그림 2-44. 스펙트르

높으면 스펙트르선들이 넓은 띠들로 되는데 이러한 스펙트르를 **띠스펙트르**라고 부른다.(그림 2-44의 ㅁ)

련속스펙트르를 이루는 빛이 물질을 지나면 일부 파장의 빛들이 흡수된다. 이러한 빛의 스펙트르에는 흡수된 빛이 놓일 자리가 검게 되는데 이것을 **흡수스펙트르**라고 부른다.(그림 2-44의 ㅂ, ㅅ)

스펙트르의 구조는 빛을 내거나 흡수하는 물질의 조성과 분자구조에 의하여 결정되므로 스펙트르를 연구하여 물질의 조성과 분자구조를 분석할수 있다.

물질의 복사 및 흡수스펙트르에 의한 분석을 **분광분석**이라고 부른다.

무지개와 쌍무지개

비가 온 뒤 무지개는 어떻게 생겨나는가.

비가 멎은 후 해가 비치면 공중에 떠있는 물방울들에서 해빛이 분산된 결과에 무지개가 생긴다. 물방울에서 빛은 굴절, 반사하는데 파장이 긴 붉은색빛은 적게 굴절되고 파장이 짧은 보라색빛은 더 많이 굴절된다. 그리하여 해를 등지고 하늘을 보는 사람의 눈에는 높은 물방울들로부터는 붉은색빛이, 좀 낮은 물방울들로부터는 보라색빛이 들어와 무지개가 보인다.(그림 2-45)

쌍무지개는 보다 높은 곳에 있는 물방울들에 들어간 해빛이 물방울속에서 두번 반사, 굴절하여 나오는것과 관련된다. 때문에 쌍무지개에서 우에 생기는 무지개는 아래 무지개와 색갈분포가 반대로 된다.(그림 2-46)

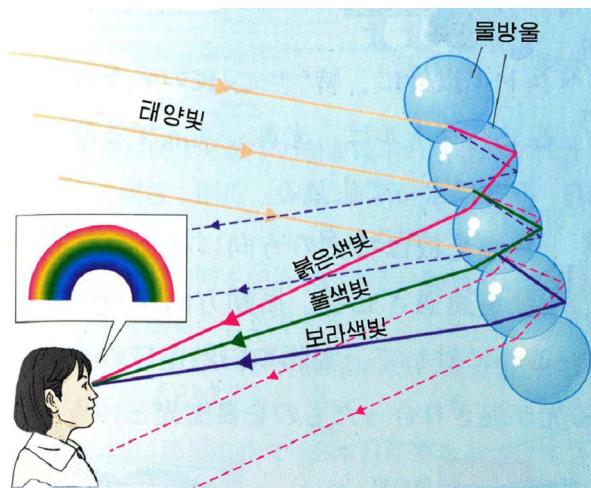



그림 2-45. 무지개가 생기는 리치

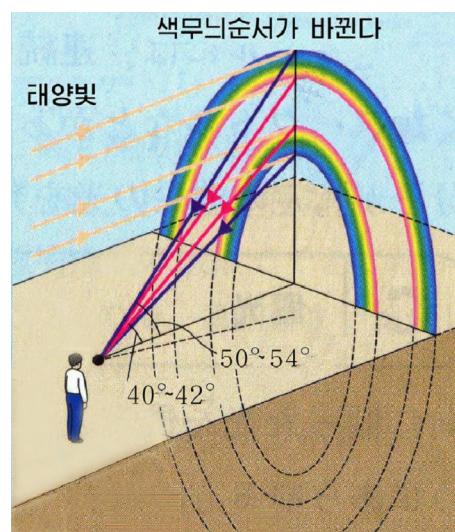



그림 2-46. 쌍무지개의 색갈분포

적외선과 자외선

눈에 보이는 여러가지 색갈의 빛을 **보임빛**이라고 부른다.

그림 2-47. 적외선과 자외선

태양빛(흰색빛)에는 보임빛외에 우리 눈에 보이지 않는 빛도 섞여있다.(그림 2-47)

붉은색빛보다 파장이 길면서 보이지 않는 빛을 **적외선**이라고 부르며 보라색빛보다 파장이 짧으면서 보이지 않는 빛을 **자외선**이라고 부른다.

적외선의 가장 뚜렷한 작용은 열작용이다. 또한 적외선은 붉은색보다 파장이 길기때문에 에돌이현상이 강하게 나타난다. 그러므로 적외선을 리용하면 일기조건(구름, 안개, 연기, 먼지, 밤)에 관계없이 사진을 찍을수 있다. 적외선은 특히 군사분야의 적외선사진촬영, 야시경, 적외선추종로케트 등에서 매우 중요한 역할을 한다. 또한 모든 물체들이 적외선을 내보내므로 비행기나 위성으로 지열을 탐지할수 있으며 수원을 찾거나 화재를 감시할수도 있다.

자외선은 태양과 같은 고온물체에서 나오는데 사진작용과 같은 화학작용, 형광작용, 살균소독작용 등을 한다.

자외선의 이러한 작용을 리용하여 형광등, 자외선등을 만든다. 자외선등은 병원의 호실이나 수술실을 소독하거나 피부병을 치료하는데 쓰인다. 자외선의 사진작용을 리용하면 매우 미소한 차이(례를 들어 종이에 남긴 지문)를 똑똑히 알아낼수 있다.

쌍무지개형성과정을 물방울속에서 빛의 반사, 굴절현상으로 설명하여라.

문 제

1. 흰빛의 스펙트르를 얻는 방법에는 어떤것들이 있으며 그렇게 얻은 스펙트르무늬는 어떤 점에서 차이나는가?
2. 흰빛을 갈랐다가 다시 모으면 흰빛이 나올수 있는가?
3. 반경이 각각 50cm와 25cm인 량면볼록렌즈가 크라운유리로 되여있다. 붉은색빛과 푸른색빛에 대한 이 렌즈의 초점거리를 구하여라.(그림 2-48)

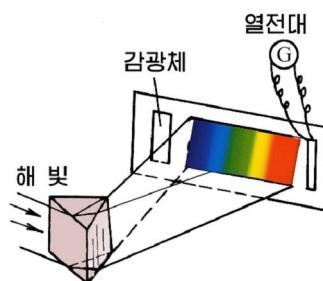
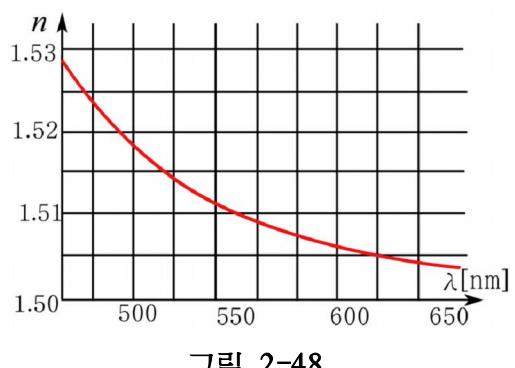



그림 2-48

제 8절. 빛의 산란

빛의 산란과 그 원인

맑게 개인날 하늘을 보면 푸르게 보인다. 또 마른 나무가 탈 때 나는 연기는 파랗게 보이지만 약간이라도 젖은 나무가 탈 때 나는 연기나 안개는 희게 보인다.

이런 현상은 무엇으로 설명하는가.

○ 맑고 깨끗한 물을 투명한 유리그릇에 담고 한쪽에서 빛을 쪼이면서 빛의 전파방향과 수직되는 방향에서 빛흐름을 본다. 빛줄기가 잘 보이지 않는다.

○ 유리그릇에 담은 물에 우유를 몇방울 떨구고 빛을 쪼여준다. 이번에는 옆에서도 빛줄기를 똑똑히 볼수 있다.(그림 2-49)

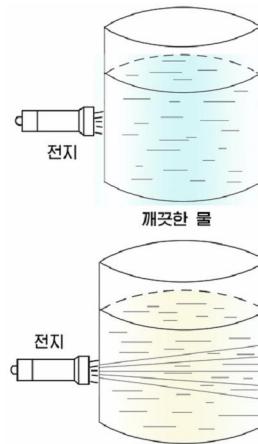



그림 2-49. 깨끗한 물에서와 흐린 물에서 빛의 전파

우의 실험은 맑고 깨끗한 물속에서는 빛이 모두 본래의 전파방향으로 곧추 나가지만 우유를 섞은 물속에서는 빛의 일부가 옆으로도 흩어져나간다는것을 보여준다.

탐조등의 빛줄기나 창문틈으로 흘러들어오는 빛줄기(해살)를 보는것도 이와 같은 현상이다. 빛이 매질속으로 전파할 때 그 일부가 본래의 전파방향에서 벗어나 사방으로 흩어지는 현상을 **빛의 산란**이라고 부른다.

이런 현상은 빛파동에서뿐아니라 소리파, 초음파, 라지오파에서도 나타난다.

빛의 산란이 일어나는 원인은 빛에 대하여 매질이 불균일한데 있다.

고른매질속에 성질이 다른 립자들이 무질서하게 섞여있으면 불균일매질로 된다.

거시적으로 볼 때 빛에 대하여 매질이 불균일하다는것은 광학적불균일성 즉 굴절률이 매질의 매 점에서 서로 다르다는것을 의미한다.

매질의 불균일성은 고른매질속에 성질이 다른 립자들이 무질서하게 섞여있는 경우뿐아니라 깨끗한 매질속에서 분자들의 무질서한 열운동에 의한 밀도의 불균일성에 의해서도 조성된다.

분자들의 무질서한 열운동때문에 매질속의 어떤 부분에 분자들이 많이 모일수 있으므로 우연적으로 밀도가 큰 부분과 작은 부분이 생길수 있다.

일반적으로 매질의 불균일성을 조성하는 불균일요소나 립자를 **산란중심** 또는 **산란립자**라고 부른다.

매질속에서 빛의 산란이 일어나는것은 이러한 산란립자들이 무질서하게 분포되여있는것과 관련된다.

빛의 산란형태

빛의 산란형태에는 흐린 매질속에서의 빛의 산란과 깨끗한 매질속에서의 빛의 산란이 있다.

깨끗한 매질속에 성질이 다른 립자들이 무질서하게 섞여있는 매질을 **흐린 매질**이라고 부른다.

흐린 매질에서는 무질서하게 섞여있는 성질이 다른 립자들이 산란중심의 역할을 한다.

흐린 매질에서 빛의 산란은 산란중심의 크기에 따라 물림새와 법칙성이 다르다.

실험에 의하면 산란중심의 크기가 빛의 파장보다 작은 경우에 산란빛의 세기가 파장의 4제곱에 거꿀비례한다.

즉 이 경우에는 파장이 짧을수록 산란이 더 세게 일어난다.

작은 연기알갱이들이 섞여있는 공기층이나 약간한 량의 우유를 잘 섞은 물그릇속에 흰색빛을 비추고 옆에서 볼 때 푸르스름하게 보이는것은 보임빛가운데서 파장이 짧은 푸른색계통의 빛이 산란되여 눈에 들어오기때문이다.

산란중심의 크기가 빛의 파장보다 큰 경우에는 산란빛의 세기가 파장의 2제곱에 거꿀비례한다. 이 경우에는 파장이 짧은 푸른색계통의 빛뿐아니라 그보다 파장이 긴 빛들이 산란에 기여하는 몫이 커진다.

젖은 나무가 탈 때 나는 연기나 작은 물방울로 된 안개가 푸르게 보이지 않고 희게 보이는 리유가 바로 여기에 있다.

산란중심의 크기가 파장에 비하여 매우 클 때에는 입사빛이 산란중심의 걸면에서 반사 또는 굴절한 결과에 빛이 산란된다. 밤에 자동차가 조명등을 켜고 달릴 때 빛줄기를 볼수 있는것은 공기중에 떠있는 굵은 먼지알갱이들에 의한 산란의 결과이다.

렐레이산란법칙

흐린 매질에서 산란중심의 크기가 파장보다 작은 경우의 산란은 영국의 물리학자 렐레이가 1899년에 리론적으로 설명하였다. 그 법칙성은 다음과 같다.

첫째로, 산란빛의 진동수는 입사빛의 진동수와 같다.

둘째로, 산란빛의 세기는 파장의 4제곱에 거꿀비례한다.

즉 $$I \sim 1/\lambda^4$$

산란중심의 크기가 파장정도인 때는 산란물림새가 에돌이특성을 가진다. 때때로 달 또는 해주위에 그를 중심으로 원둘레모양의 달무리 또는 해무리가 생기는 현상은 공기중에 있는 작은 물방울들에 의한 에돌이산란으로 설명된다.

파장이 길수록 세게 에돌므로 원둘레모양의 무지개에서 붉은색고리가 제일 바깥에 놓이고 푸른색고리가 안쪽에 놓인다.

밝은 하늘이 왜 푸르게 보이는가.

깨끗한 매질속에서의 빛의 산란은 대체로 분자들의 무질서한 열운동때문에 생긴 밀도의 불균일성에 의하여 일어난다.

계산에 의하면 이러한 산란에 의하여 매질의 단위체적에서 산란되는 빛의 세기는 파장의 4제곱에 거꿀비례한다. 이때의 산란이 흐린 매질에서의 산란과 차이나는 중요한 특징은 산란빛의 세기가 온도에 관계된다는것이다.

하늘이 푸르게 보이는것은 이러한 산란에 의하여 설명된다.

분자들의 무질서한 열운동에 의하여 빛이 전파되는 공간의 모든 점에서 밀도가 균일하지 않아 빛이 산란되는데 파장이 짧을수록 더 세게 산란되여 우리 눈에 들어온다. 그리하여 하늘이 푸르게 보인다. 그리고 아침, 저녁에는 태양빛이 대기층을 제일 길게 지나서 우리 눈에 들어오므로 태양이 붉게 보이게 된다.(그림 2-50)

그림 2-50. 하늘이 푸르게 보이며 아침과 저녁 태양빛이 붉게 보이는 리치

문제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 깨끗한 매질은 반드시 고른 매질이다.
   ㄴ) 흐린 매질은 반드시 불균일매질이다.
   ㄷ) 빛의 산란은 분산의 특수경우이다.
   ㄹ) 강물이나 바다가 푸른색으로 보이는것은 빛의 산란때문이다.
   ㅁ) 깨끗한 매질속에서도 빛의 산란이 일어난다.
2. 겨울날 입김은 희게 보이지만 여름에는 입김을 볼수 없다. 왜 그런가?
3. 깨끗한 매질에서의 산란이 흐린 매질에서의 산란과 구별되는 중요한 특징은 산란빛의 세기가 온도에 관계된다는것이다. 왜 그런가?

제 9 절. 렌트겐선(X 선)

렌트겐설비로 병원에서는 사람의 몸안을 투시해보고 공장에서는 생산된 제품의 질을 검사한다.

렌트겐선이란 무엇이며 어떤 성질을 가지고있는가.

렌트겐선

1895년에 도이췰란드의 물리학자 렌트겐은 빠른 전자가 금속겉면에 충돌할 때 특수한 복사선이 나온다는것을 발견하였다.

그 복사선은 처음에 무엇인지 몰라 《X선》이라고 하였다가 그의 본성이 밝혀진 후 발견자의 이름을 따서 렌트겐선이라고 하였다.

빠른 전자가 금속겉면에 충돌할 때 나오는 자외선보다 파장이 더 짧은(10^{-11}~10^{-9}m) 전자기파를**렌트겐선**이라고 부른다.

렌트겐선은 렌트겐관이라는 진공관으로 얻는다.(그림 2-51)

그림 2-51. 렌트겐관

렌트겐관에는 음극 K와 대음극(양극) A가 있고 K는 전류가 흐르는 가열선조에 의하여 가열되여 전자를 방출한다.

전자들은 K와 A사이의 센 전기마당의 작용으로 가속되여 큰 속도를 가지고 대음극 A에 부딪친다. 이때 렌트겐선이 복사된다.

렌트겐선은 발견된 후에도 그 본성이 인차 밝혀지지 않았다.

당시 학자들은 렌트겐선도 전자기파일것이라고 생각은 하였으나 실험으로 밝히지는 못하였다.

그것은 렌트겐선의 에돌이를 확인하는데 알맞는 에돌이살창이 없었다는 사정과 관련되여있다.

1912년에 도이췰란드의 학자 라우에가 결정체를 에돌이살창으로 하여 렌트겐선의 에돌이무늬를 얻어냄으로써 렌트겐선도 파동이며 그 파장은 결정살창의 살창상수 정도라는것이 밝혀졌다.(그림 2-52)

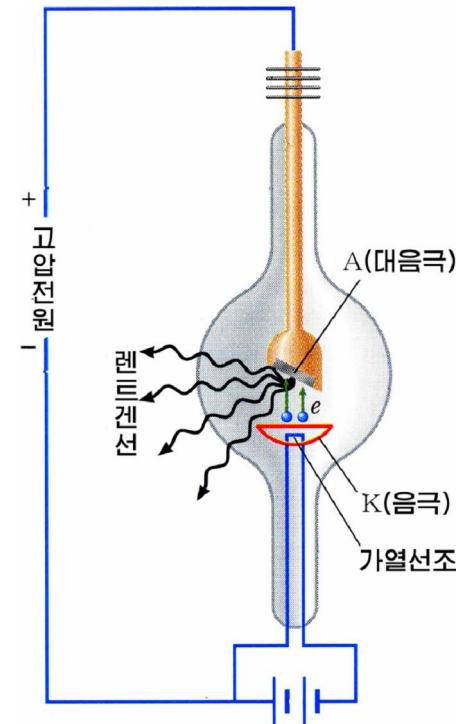
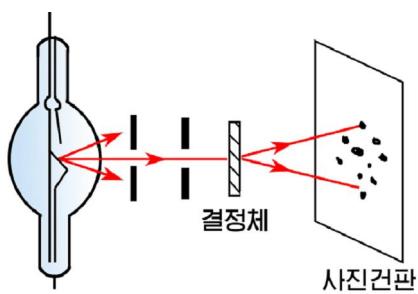



그림 2-52. 렌트겐선에돌이실험

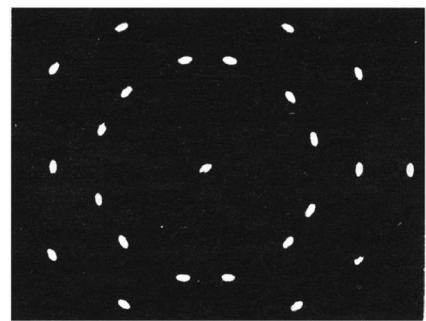



그림 2-53. 라우에무늬(인화지)

렌트겐선의 성질과 리용

렌트겐선은 파장이 짧은 전자기파로서 다음과 같은 성질을 가진다.

첫째로, 렌트겐선은 물질을 뚫고지나가는 성질이 강하다. 밀도가 작은 물질일수록 잘 통과한다.

둘째로, 렌트겐선은 물질속을 지나면서 원자, 분자들을 이온화시키며 이에 의하여 물질의 화학변화(실례로 사진작용)와 같은 여러가지 변화를 일으킨다.(그림 2-54)

그림 2-54. 렌트겐투시

셋째로, 렌트겐선은 형광물질(례하면 백금산시안화바리움 등)에 쪼이면 보임빛을 내는 등 형광작용을 한다.

넷째로, 렌트겐선은 에돌이와 간섭현상을 일으킨다. 파장이 매우 짧기때문에 에돌이살창으로 결정살창을 쓴다.

렌트겐선이 물질을 잘 뚫고지나가는 성질을 리용하여 몸안의 구조를 알아내거나 병을 진단하며 제품안에 있는 흠집을 찾아낼수 있다.

렌트겐선의 사진작용과 형광작용을 리용하여 물체의 내부를 관찰하거나 기록한다.

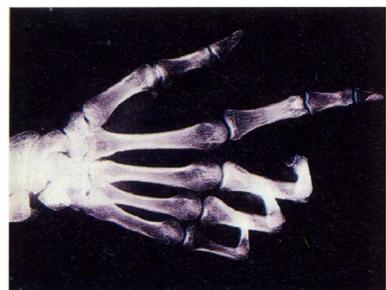
병원에서 렌트겐촬영을 하여 병을 진단하는것은 렌트겐선의 사진작용과 형광작용을 리용한것이다.

렌트겐선을 사람의 몸이나 제품에 쪼이고 그 빛을 형광판에 받으면 빛의 세기에 따라 형광판에서 보임빛을 내여 몸의 구조나 제품속의 결함을 찾아낼수 있다.

사진찍을 필요가 있으면 형광판대신 사진건판을 설치하면 된다.

렌트겐선의 에돌이무늬를 조사하면 결정의 살창구조를 알아낼수 있다. 렌트겐선의 에돌이는 렌트겐선의 파동성을 검증하는 실험적근거를 주는 동시에 렌트겐선구조분석법의 물리적기초를 이룬다.

렌트겐선에 의하여 결정살창구조를 연구하는 방법을 **렌트겐선구조분석법**이라고

부른다.

결정살창에서 렌트겐선의 에돌이극대조건은 무엇에 관계되는가.

결정에서도 원자들이 규칙적으로 배렬되여있기때문에 원자들로서 같은 분포를 이룬 무수히 많은 평면을 생각할수 있다. 이 평면이 **살창면**이다.(그림 2-55)

그림 2-55. 결정살창에서 렌트겐선의 에돌이

결정에서 이 살창면들사이의 거리(면간거리)가 D인 평행살창면들을 생각하자.

여기서 면간거리 D는 살창상수 d보다 클수 없다.

즉 $D \leq d$

이 살창면에 대하여 각 θ로 파장이 λ인 단색평행렌트겐선을 보내면 살창면들에서 렌트겐선이 반사되여 나온다. 그림 2-55에서 알수 있는바와 같이 서로 이웃한 면에서 나오는 렌트겐선들사이의 행로차는

$$\Delta r = 2D\sin\theta \qquad (1)$$

따라서 극대조건은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$2D\sin\theta = k\lambda \qquad (k=0,\ 1,\ 2,\ \cdots) \qquad (2)$$

브래그의 공식

D가 주어진 조건에서 각 θ는 k에 대응하여 불련속적인 값을 가진다. 그러므로 식 2를 만족시키는 각 θ로 입사하는 렌트겐선에 대해서만 극대방향으로 가는 렌트겐선이 나온다. 다시말하여 살창면이 식 2를 만족시키는 각 θ로 입사되는 렌트겐선은 세게 반사시키고(극대) 그밖의 다른 입사각으로 입사하는 렌트겐선은 반사시키지 않는다.(극소) 즉 살창면은 각 θ에 따라 렌트겐선을 선택반사시킨다. 이렇게 선택반사되여 찍힌 무늬가 결정살창에 의한 렌트겐선의 에돌이무늬이다. 이 무늬를 조사하여 결정구조를 알아낸다.(그림 2-56)

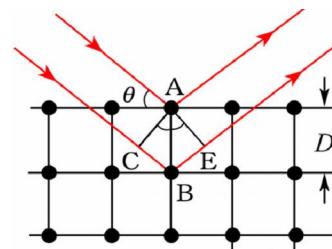
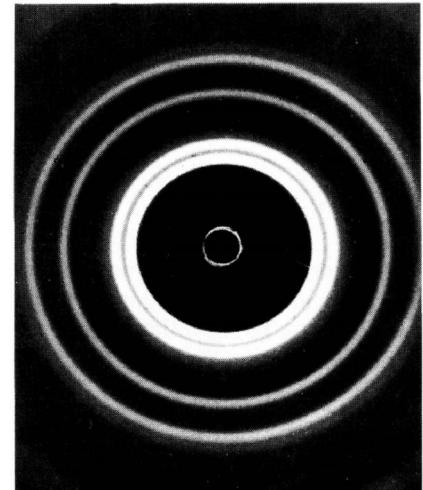



그림 2-56. 렌트겐선의 에돌이무늬

전자기파의 분류

지금까지 우리가 배운 전자기파는 넓은 파장대역을 차지하며 파장대역에 따라 그 성질들이 꼭같지 않다.

19세기초에 적외선과 자외선이 발견되였고 막스웰의 전자기리론이 확립된 후 전자기파의 존재가 실험적으로 확인되였다.

전파속도와 가로파적성질 등 본질적인 측면에서 공통점을 가지고있는것으로 하여 빛과 전자기파를 동일시하게 되였다.

그후에 렌트겐선, γ선들이 련이어 발견되여 이 모든것들이 전자기파라는것이 밝혀짐으로써 전자기파는 매우 넓은 파장대역을 차지하며 다양한 형태를 띠고있다는것이 알려졌다.

파장에 따라 전자기파의 복사방법과 성질이 달라진다.

이에 따라 전자기파를 라지오파, 적외선, 보임빛선, 자외선, 렌트겐선, γ선으로 나눈다.

라지오파는 진동회로에서 전기진동에 의하여, 적외선과 보임빛선, 자외선은 분자들의 바깥층전자들의 운동에 의하여, 렌트겐선은 빠른 전자들이 갑자기 멎거나 원자의 아낙층전자의 상태가 변할 때, γ선은 원자핵들이 변할 때 나온다.

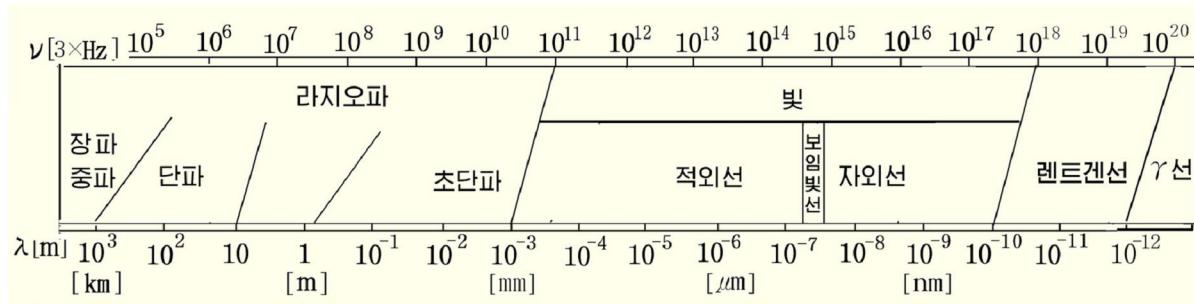



그림 2-57. 전자기파의 분류

일화 **첫 노벨물리학상을 받은 렌**

음극선관을 가지고 실험하던 영국학자 쿠룩스를 비롯한 많은 학자들은 실험실에 보관해둔 사진필림이 흐리여 못쓰게 되는 경우를 자주 당하였는데 그때마다 필림을 불량품이라고만 생각하였다. 같은 시각 도이췰란드학자 렌트겐도 음극선관으로 실험하다가 같은 현상들을 목격하였으나 그저 스쳐지나지 않았다.

어느날 음극선관에서 나오는 빛이 실험을 방해하는것을 막기 위하여 그것을 검은 종이로 감고 실험실을 캄캄하게 만든 후 거기에 높은 전압을 걸어주었을 때였다.

음극선관에서 약간 떨어진 형광판에서 빛이 나오는것을 발견한 렌트겐은 분명 보이지 않는 그 《무엇》이 형광판에 작용하여 빛을 내게 하는것이 틀림없다고 생각하였다. 그후 8주일동안 실험을 거듭하는 과정에 음극선관에서 투과력이 센 알지 못할 복사선이 나오는것으로 판단하고 이것을 《X선》이라고 불렀다.

렌트겐에 의한 X선의 발견은 원자물리학, 공학, 의학발전에 큰 공헌으로 되였으며 렌트겐은 1901년에 첫 노벨물리학상을 받았다.

렌트겐의 공적을 기념하기 위하여 사람들은 그후 X선을 《렌트겐선》이라고 하였다.

1. 렌트겐선을 전자기파로 볼수 있는 근거를 렌트겐선의 복사과정으로 설명하여라.
2. 빛의 에돌이살창으로는 렌트겐선의 에돌이를 관찰할수 없다. 왜 그런가?
3. 빛이 전자기파라는 근거는 무엇인가?
4. 소금결정에서 렌트겐선이 θ=30°의 방향에서 반사되여 첫 무늬를 주었다. 소금결정의 면간거리는 D=0.174 75nm이다. 렌트겐선의 파장을 구하여라.

문제. 물질막의 두께가 얇을수록 간섭무늬가 더 뚜렷하게 나타난다. 그 리유를 생각하여보아라.

방향.
- 빛이 간섭하자면 한 점에서 갈라진 빛을 중첩시켜야 한다.
- 빛은 매우 짧은 토막(빛토막)들의 흐름이다.
- 막의 두께가 클수록 광학적경로차가 커진다.

복습문제

1. 두개의 실틈에 의한 간섭실험에서 두 실틈사이의 간격은 0.1cm이고 실틈으로부터 비춤판까지의 거리는 3m이다. 첫 3개의 밝은 무늬의 자리를 구하여라. 빛의 파장은 λ=600nm이다.

(**답.** 1.8mm, 3.6mm, 5.4mm)

2. 실틈 S가 있는 가림판과 비춤판 E가 L만 한 거리를 두고 평행으로 서있고 평면거울 M이 수평으로 놓여있다. 실틈과 거울사이의 거리는 d로서 매우 작다. 파장이 λ인 단색빛을 실틈에 들여보내면 비춤판에는 간섭무늬가 나타난다.(그림 2-58)

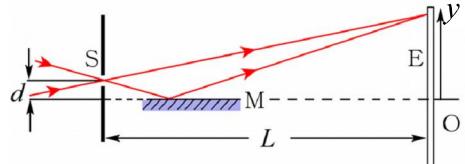



그림 2-58

ㄱ) 어떤 빛들이 간섭하는가?

ㄴ) 밝은 띠들이 있는 자리의 값을 구하여라.

ㄷ) L=50cm, d=0.1mm, λ=600nm인 때 밝은 띠사이의 간격은 얼마인가?

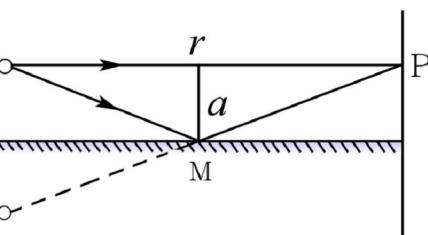
(**답.** ㄱ) 실틈 S에서 직접 나가는 빛과 거울 M에서 반사된 빛이 중첩되여 간섭한다.

ㄴ) $y=(2k-1)\dfrac{L\lambda}{4d}$ ㄷ) 1.5mm)

3. 파장이 0.6μm인 빛을 내는 광원 S와 거울 M은 그림 2-59와 같이 놓여있다. 비춤판 P에 어떤 무늬가 나타나겠는가? 여기서 SP=r=2m, a=0.55mm, SM=MP이다.

(답. 밝은 무늬 즉 극대자리이다.)

그림 2-59

4. 두 유리평판의 가장자리사이에 얇은 종이장을 끼워넣었다. 파장이 589nm인 빛을 수직으로 쪼이고 반사빛을 볼 때 극대무늬사이의 거리와 간섭무늬의 수를 구하여라. 종이의 두께는 0.05mm, 평판의 길이는 10cm이다.

(답. 0.589mm, 약 170개)

5. 유리평판우에 놓인 평볼록렌즈에 의해 간섭무늬를 볼 때 파장이 450nm인 푸른색빛의 반사에 의해 생긴 세번째 밝은 고리의 반경이 1.06mm였다. 여기에 붉은색빛을 비추었더니 다섯번째 밝은 무늬의 반경이 1.77mm였다. 렌즈의 구면반경과 붉은색빛의 파장을 구하여라. (답. 1m, 696nm)

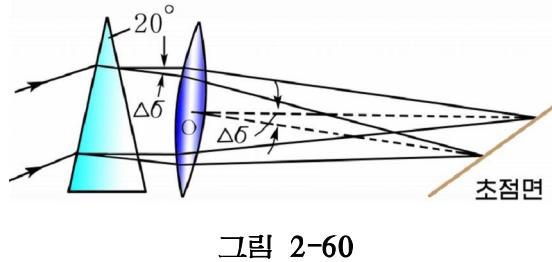
6. 드림면방향으로 세운 비누물막은 자체의 무게로 쐐기모양으로 된다. 파장이 546.1nm인 빛을 막에 수직으로 쪼이고 간섭무늬를 볼 때 5개 무늬사이 거리가 2cm였다. 쐐기의 정각을 구하여라. 비누물막의 굴절률은 1.33이다.

(답. 약 4.1×10^{-5}rad)

7. 유리에 씌운 반사방지막에서 파장이 500nm인 빛에 대하여 반사를 최소로 되게 하자면 그의 두께를 얼마로 해야 하는가? 막의 굴절률은 1.3이고 빛은 면에 거의 수직으로 들어간다. (답. 약 96nm)

8. 반사방지막에서는 막의 두 경계에서 반사되여나오는 빛들이 간섭하여 반사빛을 없앤다. 그러면 반사빛의 에네르기는 어디로 갔겠는가? 반사빛의 에네르기가 내부에네르기와 같은 다른 형태의 에네르기로 넘어가지 않았겠는가? 이것을 설명해보아라.

9. 뉴톤고리실험에서 평볼록렌즈를 드림선우로 약간씩 이동시키면 뉴톤고리가 어떻게 변하겠는가? 광원이 내는 빛은 단색빛이다.

10. 막의 두께가 얇을수록 반사빛의 간섭이 잘 관측되는 리유를 설명하여라.

11. 두 실틈사이간격이 0.5mm인 에돌이살창을 눈에 대고 실틈방향에 평행되게 5m 떨어진 거리에 있는 직선광원을 보았더니 린접한 두 밝은 선사이의 거리가 6mm였다. 빛의 파장을 구하여라.

(답. 600nm)

12. 1mm 너비에 100개의 틈이 있는 에돌이살창을 거쳐 1m앞에 있는 불이 켜진 작은 전등을 보아라. 살창의 중심으로부터 살창면방향으로 11cm 되는 거리에는 어떤 색이 보이겠는가?

(답. λ=550nm의 풀색)

13. 살창상수가 $d=2\times10^{-4}$cm인 에돌이살창에 빛을 수직으로 쪼인다. 이때 비춤판에 얻어진 1차스펙트르에서 λ_1=577nm인 빛과 λ_2=579.1nm인 빛은 서로 얼마의 거리에 떨어져있는가? 렌즈의 초점거리는 0.6m이다.

(답. 0.63mm)

14. 나트리움원자에서 나오는 빛(λ=589nm)을 에돌이살창에 수직으로 쪼였더니 3차극대가 $\varphi'=10°11'$에 나타났다. 이 살창에 어떤 빛을 쪼였더니 2차극대가 $\varphi''=6°16'$의 방향에 생겼다면 이 빛의 파장은 얼마인가?

(답. 약 545nm)

15. 후이겐스-프레넬의 원리에서 파면우의 모든 점들을 간섭성파원으로 볼수 있는것은 무엇때문인가?

16. 대체로 밤에 두 자동차가 마주 올 때 운전수들은 엇바꾸어가면서 조명등을 껐다켰다한다. 왜 그렇게 하는가? 빛쏠림판을 리용하면 이렇게 하지 않아도 된다. 어떻게 하면 되겠는가?

17. 어떤 투명한 물질로부터 공기로 나가는 경계면에서 전반사의 림계각이 45°이다. 이 물질의 겉면에서 빛이 반사할 때 브류스터각은 얼마인가?

(답. 54°44′)

18. 투명평행평판의 한쪽면으로부터 브류스터각으로 빛이 입사할 때 평행평판의 다른쪽 경계면에서의 굴절각은 그 면에서의 브류스터각으로 된다는것을 증명하여라.

19. 보임빛에 대한 굴절률이 1.64~1.69인 유리로 된 프리즘과 렌즈가 그림 2-60과 같이 놓여있고 흰색평행빛이 프리즘에 들어갈 때 렌즈의 초점면에서 보이는 빛스펙트르의 너비는 얼마인가? 프리즘의 정각은 20°, 렌즈면들의 구면반경은 각각 50cm이다.

그림 2-60

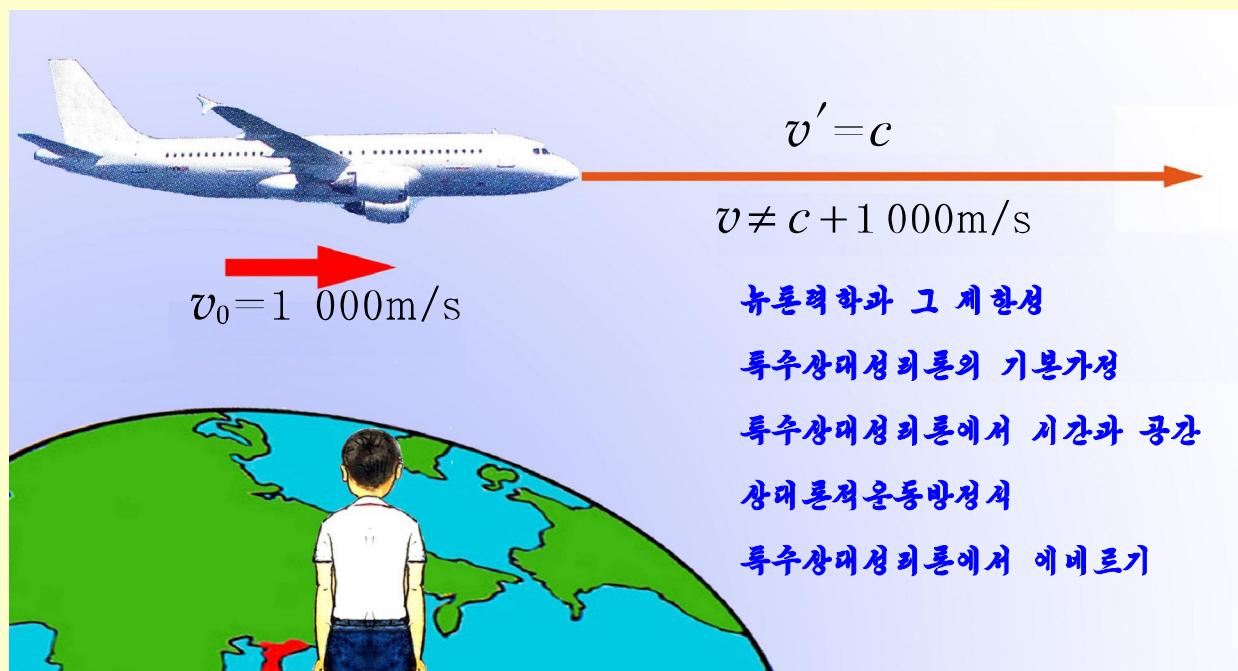
(답. 약 28mm)

20. 겨울날에 비하여 맑은 여름날에 하늘이 더 푸르게 보인다. 그 리유는 무엇인가?

21. 안개가 낀 날에 앞을 가려보기 힘든것은 무엇때문인가?

22. 살창면과 쪼이는 렌트겐선사이의 각이 최소 얼마일 때 파장이 0.02nm인 렌트겐선이 살창면에서 반사되겠는가? 면간거리는 0.281nm로 보아라.

(답. 약 2°5′)

23. 라지오파로부터 γ선에 이르기까지의 전자기파의 공통적인 성질은 무엇이며 복사방식에서의 차이점은 무엇인가?

제3장. 특수상대성리론의 초보

일상생활에서 우리가 물체의 운동을 관찰할 때에는 그 운동을 정확히 말하기 위하여 어떤 물체를 기준으로 정하며 운동이 진행되는 과정에 흘러간 시간은 시계를 리용하여 측정한다. 이때 기준물체로부터 주어진 물체까지의 거리나 물체의 운동은 기준물체를 어떻게 선정하는가에 따라 다르게 나타난다. 흘러간 시간은 한자리에 멎어서서 재든 달리면서 재든 다 같은것으로 여기며 이렇게 생각하는것을 응당한것이라고 보아왔다.

그러나 뉴톤력학이 기초하고있는 공간과 시간에 대한 이러한 고전적견해는 진공속에서의 빛속도나 그에 가까운 속도를 가지고 일어나는 물리적현상들에 대하여서는 옳바른 설명을 주지 못한다.

특수상대성리론은 빛속도에 비해 아주 작은 속도로 일어나는 운동에만 국한되여있던 공간과 시간에 대한 고전적표상을 빛의 전파현상을 포함한 전자기현상에까지 일반화하는 과정에 나오게 되였다. 특수상대성리론은 빛속도에 비하여 훨씬 작은 속도로부터 빛속도에 이르기까지의 속도령역에서 일어나는 력학적운동, 전자기적현상들을 포함한 물리적현상들에 대하여 다같이 옳은 설명을 주는 물리학의 리론이다.

제 1 절. 뉴톤력학과 그 제한성

갈릴레이상대성원리

기준물체를 다르게 하면 같은 운동도 서로 다르게 보인다. 그러므로 고전력학적운동을 살펴볼 때 주어진 운동이 관측되는 기준계를 반드시 지적한다.

고전력학에서 기준계는 기준물체에 잡은 자리표계를 말한다. 이때 뉴톤의 제1법칙이 성립하는 기준계를 관성기준계 또는 간단히 관성계라고 한다.

우리가 지하전동차에 타고있을 때 반대쪽에 있는 전동차만 보아서는 자기가 타고있는 전동차가 멎어있는지 움직이는지 구별할수 없다. 이런 현상은 지하철도에서 계단승강기를 타고 올라가면서 다른 계단승강기를 탄 사람들을 마주 볼 때에도 느낄수 있다. 만일 멎어있는 전동차와 등속직선운동하는 전동차안에서 꼭같은 처음속도와 각도로 철구를 던지는 실험을 한다면 처음조건이 같을 때에는 철구의 운동이 꼭같이 관측된다.

멎어있는 전동차나 등속직선운동하는 전동차는 관성계로 생각할수 있다. 그러므로 우에서 이야기한 사실들은 서로 등속직선운동하는 두개의 관성계가 있을 때 같은 조건에서 빛속도보다 훨씬 작은 속도로 일어나는 력학적운동을 보고서는 두개의 관성계를 서로 구별할수 없다고 생각할수 있게 한다.

이로부터 꼭같은 조건에서 모든 관성계에서는 력학적운동이 꼭같게 일어난다고 보고 이 가정을 **갈릴레이의 상대성원리**라고 부른다.

처음조건이 같은 모든 관성계에서 력학적운동이 꼭같게 일어나려면 모든 관성계에서 력학적운동에 대한 운동법칙이 꼭같아야 한다. 그것은 운동법칙이 같아야 같은 처음조건을 넣을 때 같은 결과가 나올수 있기때문이다. 그러므로 갈릴레이의 상대성원리를 <u>모든 관성계에서 력학적운동법칙은 꼭같다</u>라고 표현할수 있다.

갈릴레이의 상대성원리는 력학적운동을 관찰할 때 모든 관성계들은 물리적으로 같은 자격을 가지고있으며 서로 구별할수 없다는것을 보여준다. 이 사실을 <u>모든 관성계들은 물리적으로 등가이다</u>라고 표현한다.

갈릴레이변환

갈릴레이의 상대성원리에 의하여 한 관성계에 대하여 등속직선운동하는 다른 기준계는 관성계로 된다.

두 관성계에서는 력학적운동이 동일한 력학적법칙을 만족하면서 일어난다.

? 그러면 두 관성계에서 질점의 운동을 관찰할 때 질점의 자리표와 흘러간 시간들이 어떻게 관계되겠는가.

한 관성계 K에 대하여 x축방향으로 일정한 속도 v_0을 가지고 등속운동하는 다른 관성계 K′가 있다고 하자. 그리고 처음순간에 두 관성계가 서로 겹쳐있었다고 하자. 이때 력학적운동은 상대적으로 관찰되므로 두 관성계에서의 질점의 자리표들에 대해서는 다음의 관계식이 성립한다.(그림 3-1)

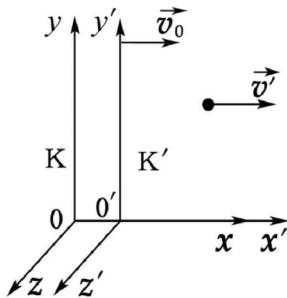



그림 3-1. 두 관성계에서 질점의 운동고찰

$$x' = x - v_0 t$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

갈릴레이변환에서 자리표들사이의 관계 (1)

이때 두 관성계 K, K′에서 시간은 동일하게 흘러간다고 간주하였다. 즉

$$t' = t$$

갈릴레이변환에서 시간관계식 (2)

식 1과 2를 뉴톤력학에서 **갈릴레이변환식**이라고 부른다.

갈릴레이변환식은 서로 상대적으로 운동하는 두 관성계에서 력학적운동을 살펴볼 때 공간자리표들과 시간들사이의 관계를 보여준다. 이때 공간자리표는 주어진 관성계를 기준으로 하여 관측되나 시간은 모든 관성계에서 다 같기때문에 주어진 관성계와는 련관이 없는 시계에 의하여 관측될수 있다. 그러므로 뉴톤력학에서는 시간이 공간자리표와 결합되지 않은 다른 독립적인 시계에 의하여 관측될수 있는 량으로 된다.

뉴톤력학에서 시간과 공간

일상생활에서 우리는 시계를 차고있는 사람이 멎어있든, 등속직선운동하든 시계가 꼭같게 간다고 생각한다. 그리고 이렇게 생각하여도 아무런 착오를 느끼지 못하고있다. 그렇다고 하여 운동이 빛속도에 가까운 속도로 일어나는 현상들을 관찰하는 경우에도 서로 다른 관성계에 놓여있는 시계들이 꼭같게 간다고는 말하기 곤난하다. 그것은 일상생활에서 우리가 대상하는 물체의 운동은 빛속도에 비하여 속도의 크기가 훨씬 작은 운동들이기때문이다.

어떤 물리적량이 한 관성계에서와 그에 대하여 일정한 속도를 가지고 운동하는 다른 관성계에서 관찰할 때 같게 보이면 그 물리적량은 **절대성**을 띤다고 말하며 다르게 보이면 **상대성**을 띤다고 말한다.

그러면 뉴톤력학에서 길이와 시간간격은 물체의 운동과 어떻게 관계되겠는가.

갈릴레이변환식으로부터 알수 있는것처럼 서로 일정한 속도로 등속직선운동하는

두개의 관성계 K, K′가 있을 때 력학적운동을 관성계 K에서 관측한 시간간격을 $t_2 - t_1$라고 하고 관성계 K′에서 관측한 시간간격을 $t_2' - t_1'$라고 하면

$$t_2 - t_1 = t_2' - t_1'$$

로 된다. 이와 함께 x축방향으로 놓여있는 가는 막대기를 관성계 K에서 측정한 길이를 $l = x_2 - x_1$이라고 하고 동일한 막대기를 관성계 K′에서 측정한 길이를 $l' = x_2' - x_1'$라고 하면 $l = l'$가 성립한다. 여기서 자리표 x_1, x_2는 관성계 K에서의 막대기의 첫끝과 마지막끝의 자리표들이며 x_1', x_2'는 관성계 K′에서의 막대기의 첫끝과 마지막끝의 자리표들이다.

이것은 뉴톤력학에서 물체의 길이와 흘러간 시간간격은 절대성을 띤다는것을 의미한다. 막대기의 길이가 서로 등속운동하는 관성계를 달리할 때 달라지지 않는다는것은 길이를 재는 자의 눈금간격 즉 길이의 척도가 달라지지 않는다는것으로 리해할수 있다. 마찬가지로 관성계를 달리할 때 시간간격이 달라지지 않는다는것은 시간을 재는 시간의 척도가 달라지지 않는다는것으로 리해할수 있다. 이것은 뉴톤력학에서 물체의 길이와 시간간격 즉 물체의 길이와 시간의 척도가 절대성을 띤다는것을 의미한다.

한편 뉴톤력학에서는 물체의 길이와 시간이 관성계의 운동속도에는 관계되지 않는다. 관성계의 자리표원점을 어떤 관성계에 대하여 등속운동하는 기준물체에 정할수도 있다는것을 생각하면 이것은 뉴톤력학에서 길이와 시간이 물체의 운동과는 관계되지 않는다는것을 의미한다.

따라서 뉴톤력학에서는 공간과 시간자체를 특징짓는 길이와 시간의 척도가 관성계를 달리할 때 달라지지 않는다.

길이가 불변성을 가진다는 의미에서 공간자체는 절대성을 띤다고 말한다. 이것은 공간에서 물체의 운동도 절대성을 띤다는것을 의미하지는 않는다. 운동은 여전히 상대적으로 관찰된다. 질점의 운동이 어떤 관성계를 기준으로 하여 관찰하는가에 따라 다르게 보이므로 운동하는 질점의 위치를 결정하는 질점의 공간자리표 $\vec{r}$는 상대적인 량으로 된다.

고전력학의 제한성

갈릴레이변환식으로부터 갈릴레이의 속도합성규칙을 쉽게 얻을수 있다.

$\vec{v} = \vec{v}' + \vec{v}_0$ **갈릴레이속도합성규칙** (3)

$\vec{v}$, $\vec{v}'$: 두 관성계에서 속도벡토르[m/s]

$\vec{v}_0$: 두 관성계의 상대속도[m/s]

그러면 뉴톤력학적표상에 기초하여 얻은 결과들을 전자기파인 빛이나 진공속에서의 빛속도정도로 빠르게 운동하는 대상에 적용할 때 어떤 제한성들이 나타나겠는가.

가령 진공속에서의 빛의 전파가 력학적운동에 대하여 얻은 갈릴레이속도합성규칙인 식 3을 만족시킨다면 어느 한 관성계(비행기)에서의 빛의 속도 $\vec{v}'$가 진공속에서의 빛속도와 같을 때 다른 관성계(지구)에서의 빛속도는 관성계들사이의 상대운동속도(지구에 대한 비행기의 속도) $\vec{v}_0$에 따라 진공속에서의 빛속도보다 클수도 있고 작을수도 있다는 결과가 나온다.

그런데 특수상대성리론이 출현하게 된 당시까지 알려진 실험적사실들은 진공속에서의 빛속도가 관성계에 관계없이 언제나 일정한 최대속도로 된다는것을 보여주었다. 결국 갈릴레이속도합성규칙은 전자기파인 빛의 전파속도문제에 적용할 때 진공속에서의 빛의 속도가 최대속도로 된다는 실험적사실과 모순되는 결과를 준다.(그림 3-2)

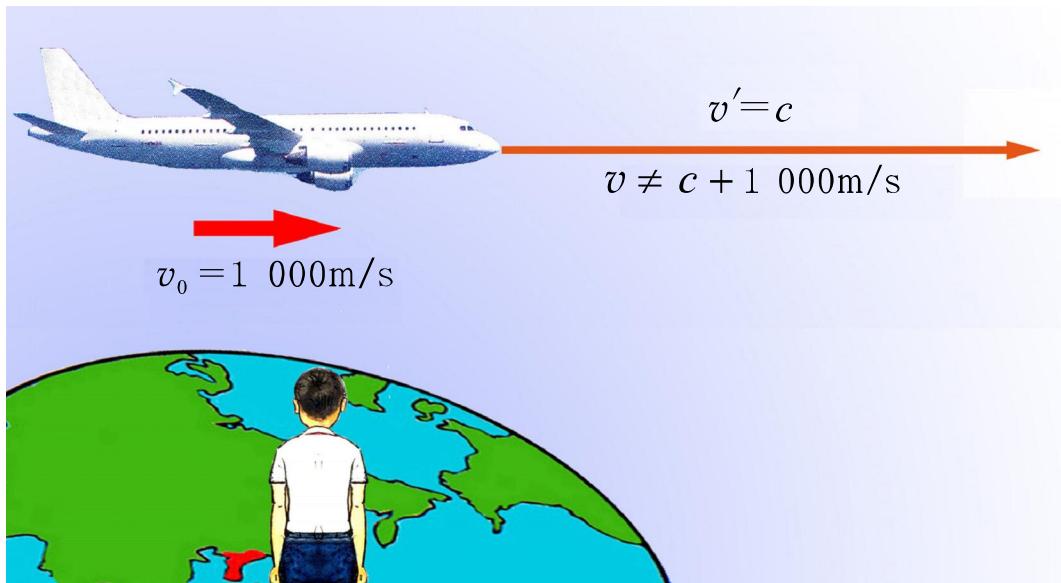



그림 3-2. 갈릴레이속도합성규칙에 의한 빛속도관측

뉴톤력학에 따르면 현대적립자가속장치들에서 전자를 진공속에서의 빛속도까지 가속시키려면 립자에

$$E = \frac{m_e c^2}{2} \approx 0.25\,\mathrm{MeV}$$

만 한 에네르기를 주면 충분하다. 여기서 m_e는 전자의 질량, c는 진공속에서의 빛속도이다. 그러나 현실적으로 립자가속장치들에서는 이보다 8 000배나 큰 2GeV만한 에네르기를 전자에 주어도 전자의 속도를 빛속도에 이르게 하지 못하고있다.

이것은 뉴톤력학이 빛속도나 그에 가까운 속도로 운동하는 대상에 대하여서는 옳바른 설명을 주지 못한다는것을 말해준다.

핵반응과정에 질량의 변화에 해당한 거대한 에네르기가 방출된다는 사실은 오늘

잘 알려져있다. 그러나 이러한 현상도 뉴톤력학에서 얻어지는 법칙들로써는 리해할 수 없다.

뉴톤력학의 제한성은 빛속도에 비하여 아주 작은 속도를 가지고 일어나는 물리적현상들에 대한 경험과 분석에 기초하여 자기의 근본원리를 수립한것으로 하여 나타나는 원리적인 제한성이다.

문 제

1. 뉴톤력학에서 관성계란 무엇인가?
2. 갈릴레이변환은 시간과 공간자리표에 대하여 무엇을 말해주는가?
3. 뉴톤력학에서 상대적인 량과 절대적인 량들을 실례로 들어라.
4. 다음의 문장들에서 정확성을 판단하여라.

ㄱ) 갈릴레이상대성원리는 모든 관성계에서 자연현상을 서술하는 물리법칙들은 다 같다는것을 말해준다.

ㄴ) 어떤 질점이 운동할 때 그 운동자리길은 모든 관성계에서 꼭같이 보인다.

ㄷ) 멎어있는 사람이 립자의 속도를 측정하니 진공속에서의 빛속도보다 500m/s 작았다. 속도가 60m/s인 승용차를 타고가는 사람이 이 립자의 속도를 측정하는 경우에는 속도가 빛속도보다 440m/s 작게 관측될것이다.

ㄹ) 뉴톤력학에서는 질점들사이에 작용하는 힘이 순간적으로 전달된다고 간주한다.

ㅁ) 운동장에 서있는 학생의 키는 서로 다른 관성계에서 같게 보인다.

제 2 절. 특수상대성리론의 기본가정

상대성원리

뉴톤력학에서 모든 력학적운동에 대해서는 갈릴레이의 상대성원리가 성립한다.

그러면 이러한 상대성원리가 력학적운동에만 적용되겠는가 아니면 전자기적현상에 대해서도 일반화할수 있겠는가.

자석과 선륜이 있을 때 어떤 관성계 K에 대하여 자석이 선륜의 중심을 따라서 일정한 속도 v로 운동한다고 하자.(그림 3-3)

그림 3-3. 관성계들에서의 유도전류의 발생고찰

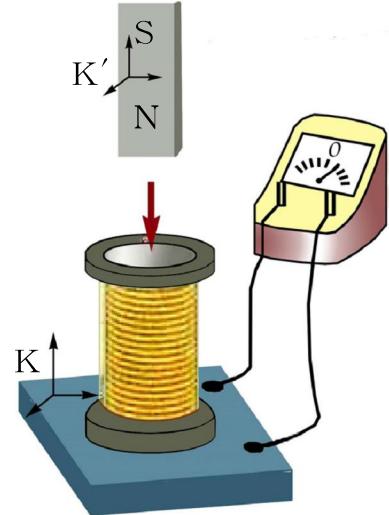
이때 선륜의 자름면을 지나가는 자력선묶음이 변하며 따라서 선륜에는 유도전류가 생긴다. 이때 이 현상을 자석이 운동하는것으로 관찰되는 관성계 K에서 관찰하든 자석이 멎어있는것으로 관찰되는 관성계 K′에서 관찰하든 선륜에는 꼭같은 유도전류가 흐르는것으로 관찰된다.

실험에서 알수 있는것처럼 어느 관성계에서 관찰하든 선륜에 흐르는 유도전류는 꼭같다. 이것은 력학적운동에 대해서뿐아니라 전자기적현상에 대해서도 같은 조건에서 일어나는 물리적현상은 두 관성계에서 꼭같다는것을 말하여준다.

이로부터 력학적운동뿐아니라 전자기적현상도 포함하여 같은 조건에서 모든 관성계에서는 물리적현상이 꼭같게 일어난다고 가정하였다. 이 가정을 **아인슈타인의 상대성원리** 간단히 **상대성원리**라고 부른다.

상대성원리는 모든 관성계에서 물리적현상들을 서술하는 물리법칙은 다 같다라고 표현할수 있다. 이것은 같은 조건에서 일어나는 물리적현상을 보아서는 어느 관성계에서 관찰하는지 알수 없으므로 모든 관성계들은 물리적으로 등가이라는것을 의미한다.

빛속도불변의 원리

빛의 전파속도에 대한 많은 측정실험은 진공속에서의 빛의 전파속도가 $c=3\times10^8$m/s로서 관성계에 관계없이 일정하다고 주장할수 있는 실험적근거를 주었다.

실례로 마이켈손의 빛속도측정실험을 들수 있다.

이와 함께 실험적사실들은 빛속도는 자연계에서 존재하는 한계속도 즉 최대속도라고 생각할수 있다는것을 보여주었다. 이로부터 빛속도를 자연계에서 존재하는 **한계속도** 즉 **최대속도**라고 할수 있다.

⚠ 빛속도가 최대속도로 된다는것은 실제적인 물리적대상의 속도가 빛속도보다 커질수 없다는것을 념두에 둔다.

그런데 전자기파인 빛에 대하여 나타나는 이러한 사실은 뉴톤력학적표상에 기초해서는 설명할수 없었다.

그러므로 뉴톤력학으로써는 설명되지 않는 이 새로운 실험적사실을 반영하여 새로운 원리적인 한가지 가정 즉 빛속도불변성이라는 가정을 더 하게 되였다.

여러가지 실험적사실들로부터 자연계에 존재하는 최대속도로서 진공속에서의 빛의 전파속도는 모든 관성계에서 일정한 값($c=3\times10^8$m/s)을 가진다. 이 가정을 **빛속도불변성** 또는 **빛속도불변의 원리**라고 부른다.

상대성원리와 빛속도불변성을 통털어서 **아인슈타인의 특수상대성리론의 기본가정** 또는 **특수상대성원리**라고 부른다.

마이켈손의 빛속도측정실험

여러가지 관성계에서 빛속도를 정확히 재기 위한 많은 실험들이 진행되였는데 그중 유명한 실험이 마이켈손이 진행한 실험이다.

마이켈손은 한 곳에서 나오는 빛을 두개로 갈라 하나는 지구의 운동방향과 수직으로 보내고 다른 하나는 지구의 운동방향으로 보냈다가 두 빛이 간섭하게 하였다.

마이켈손의 실험장치는 두 방향으로 보낸 빛의 전파속도에서 미소한 차이라도 나타난다면 두 빛을 리용하여 간섭무늬의 변화를 관측할수 있게 되여있다.

실험에서는 간섭무늬의 변화가 관측되지 않았다. 처음에는 지구의 운동속도가 아주 크기때문에 갈릴레이속도합성규칙에 따라서 두 방향에서의 빛속도의 차이가 비교적 클것이라고 생각하였다. 그런데 실험은 광원이나 관측자가 어떻게 운동하는가에 관계없이 빛의 전파속도가 언제나 같다는 결과를 주었다.

문 제

1. 특수상대성리론은 뉴톤력학의 어떤 제한성으로부터 세워지게 되였는가?
2. 특수상대성원리는 왜 지금까지 가정으로 남아있는가?
3. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 특수상대성원리는 가정이 아니다.
   ㄴ) 모든 물질에서 빛의 전파속도는 다 같다.
   ㄷ) 어떤 속도를 생각하든지 그 크기는 진공속에서의 빛속도를 초과할수 없다.
   ㄹ) 특수상대성리론은 뉴톤력학의 내용을 자체내에 포함하여야 한다.

제 3 절. 특수상대성리론에서 시간과 공간

동시각의 상대성

뉴톤력학에서는 어떤 두 물리적현상이 동시에 일어난다고 하면 그 두 현상은 어떤 관성계에서 관찰하든지 언제나 동시에 일어나는것으로 본다. 그러나 특수상대성리론에서는 물리적현상들이 동시에 일어난다는 사실이 뉴톤력학에서 생각하던것과는 완전히 다르게 해석된다.

그러면 특수상대성리론에서는 동시각이라는것이 어떻게 해석되겠는가.

기차가 수평인 직선자리길을 따라 일정한 속도로 빨리 달린다고 하자. 이때 려객차량(한 관성계)의 중심에 놓여있는 광원에서 빛이 한번 번쩍하고 방출되여 차량의 앞벽과 뒤벽쪽으로 간다고 하자.

이때 빛이 려객차량의 앞벽과 뒤벽에 도달하는 시각들이 기차에 타고있는 관측자와 기차밖의 땅면에 서있는 관측자에게는 어떻게 보이겠는가.

기차안에 있는 관측자는 앞벽과 뒤벽이 중심에서 동일한 거리만큼 떨어져있고 빛의 전파속도가 앞쪽과 뒤쪽 방향에서 다 같기때문에 빛이 앞벽과 뒤벽에 동시에 떨어진다고 생각한다. 그러나 기차밖의 땅면(다른 관성계)에 서있는 관측자는 기차가 앞으로 이동하기때문에 빛이 먼저 뒤벽에 이르고 후에 앞벽에 도달한다고 생각한다.

기차안에 타고있는 관측자에게는 동시에 일어나는것으로 관측되는 물리적현상이 기차밖에 있는 관측자에게는 동시에 일어나는것으로 관측되지 않는다.(그림 3-4)

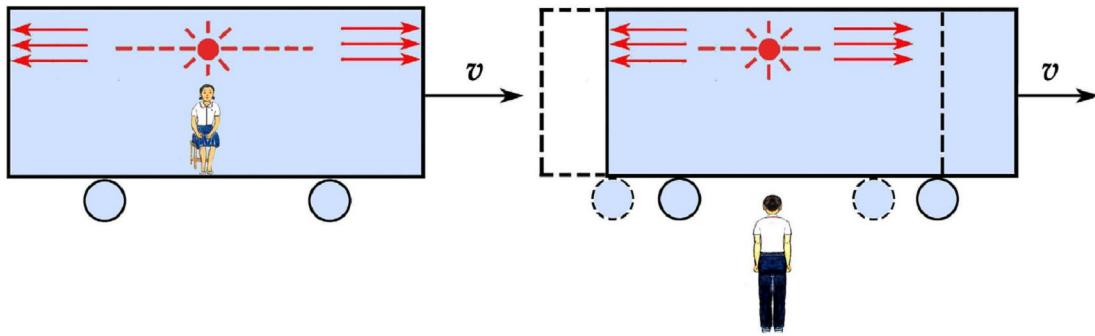



그림 3-4. 동시각의 상대성

이와 같이 어떤 관성계에서는 동시에 일어나는 현상이 다른 관성계에서는 동시에 일어나지 않는것으로 되는 사실을 **동시각의 상대성**이라고 부른다.

동시라는 개념은 관성계에 따라 달라지는 상대적인것으로 된다. 그러나 우리의 일상생활에서는 물체의 운동속도에 비하여 빛의 전파속도가 너무 크기때문에 빛이 앞벽과 뒤벽에 이르는 시간의 차이를 가려내기 힘들므로 이러한 동시각의 상대성을 느끼지 못한다.

시간의 지연

시간은 고정불변한가 아니면 관성계에 따라 달라지는가.

려객차량의 밑바닥에 놓여있는 광원에서 차량의 천정쪽으로 수직으로 방출된 빛이 천정에 있는 거울에서 반사되여 돌아오는 현상을 기차에 타고있는 사람과 기차밖의 땅면에 서있는 사람이 본다고 하자.(그림 3-5)

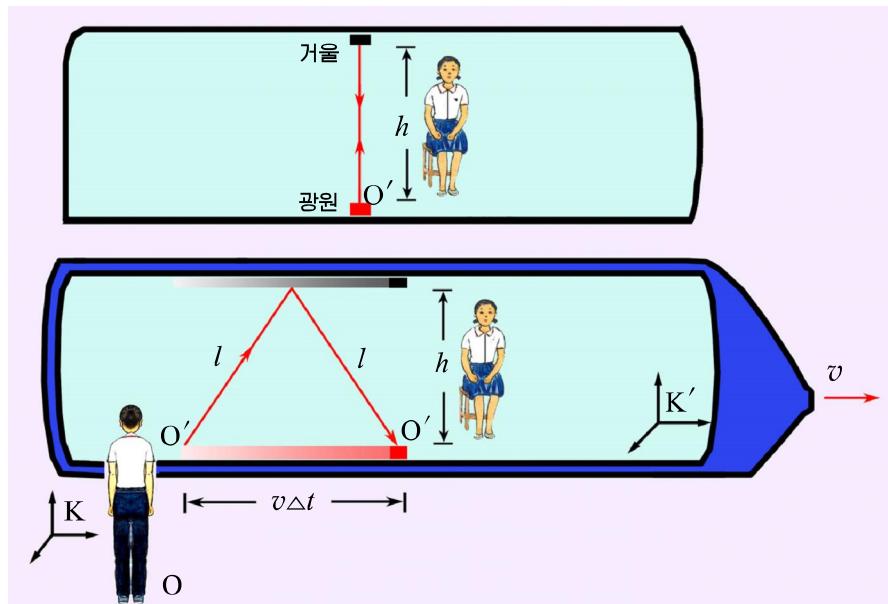



그림 3-5. 두 관성계에서 시간이 다르게 나타난다

기차안에 타고있는 사람이 관찰할 때 빛이 천정에 있는 거울에서 반사되여 다시 제자리로 돌아오는데 걸린 시간간격 Δt_0 은

$$\Delta t_0 = \frac{2h}{c} \qquad (1)$$

이다. 여기서 c는 진공속에서의 빛속도이다.

그러나 땅면에 서있는 사람이 이 현상을 관찰할 때 걸린 시간간격 Δt는 식

$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = h^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 \qquad (2)$$

으로부터 결정된다. 여기서 v는 기차의 속도이다. 식 1, 2로부터

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \qquad \text{시간의 지연} \qquad (3)$$

로 된다. 이것은 기차안에서 생긴 현상이 일어나는 시간을 땅면에 서있는 사람은 기차안에 타고있는 사람보다 더 길게 관측한다는것을 의미한다. 다시말하여 사건이 일어난 관성계에서 잰 사건의 지속시간(고유시간)보다 그에 대하여 운동하는 관성계에서 잰 사건의 지속시간(상대시간)이 더 길어진다. 이것을 **시간의 지연**현상이라고 부른다.

※ 특수상대성리론에서는 공간의 어떤 자리에서 어떤 순간에 물리적현상이 일어났다는 것을 일어난 물리적현상의 내용에는 주목을 돌리지 않고 어떤 사건이 발생하였다고 표현한다.

시간의 지연현상은 가상적으로 그렇게 보이는 현상이 아니라 실제적으로 나타나는 현상이다.

시간의 지연현상은 뮤온의 수명측정에서 실제적으로 관측되였다. 뮤온의 수명(고유수명)은 멎어있는 관성계에서 2.0 μs이다. 그러므로 속도가 약 $0.99c$인 뮤온은 자기의 수명동안에 약 590m만큼 운동할수 있다고 생각할수 있다. 그러나 땅면에서 운동하는 뮤온을 관측하면 뮤온의 운동거리는 이보다 훨씬 길었다. 이것은 땅면에서 운동하는 뮤온을 관측할 때 수명이 2.0 μs보다 훨씬 길어진다는것을 의미한다.

시간의 지연현상은 시간간격이 고정불변한것이 아니라 관성계에 따라 달라지는 상대적인 량이라는것을 보여준다. 시간의 지연현상은 운동속도가 빛속도에 다가갈수록 더 심하게 일어나며 빛속도보다 매우 작을 때에는 거의 관측되지 않는다.

길이의 수축

? 물체의 길이도 관성계에 따라 달라지겠는가.

일정한 길이를 가진 막대기가 그 길이방향이 기차가 운동하는 방향과 일치하도록 려객차량안에 놓여있다고 하자. 이 막대기의 길이를 려객차량안에 타고있는 관측자와 기차밖의 땅면에 서있는 관측자가 측정한다고 하자.(그림 3-6)

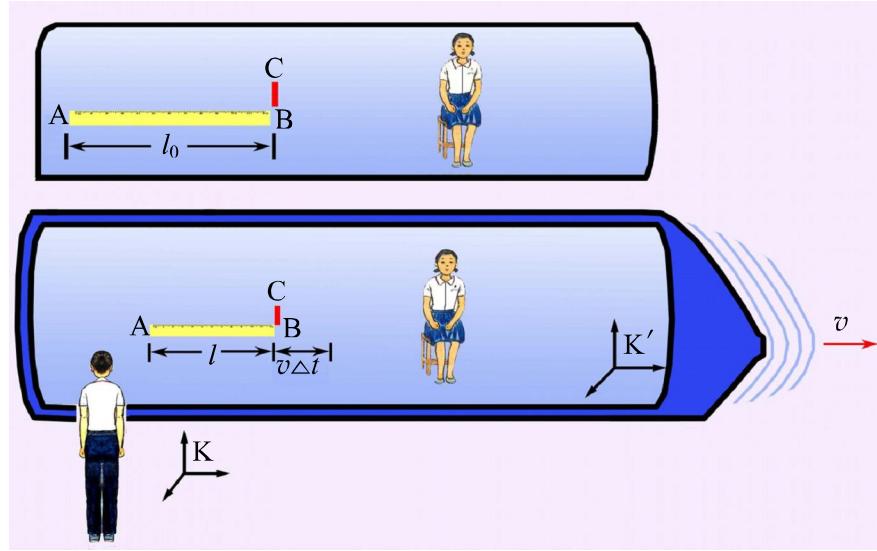



그림 3-6. 두 관성계에서 길이가 다르게 나타난다

두 관측자가 막대기의 길이를 측정할 때 기차에 타고있는 사람(관성계 K′)이 측정한 막대기의 길이는 l_0, 기차밖의 땅면에 서있는 사람(관성계 K)이 측정한 막대기의 길이는 l이라고 하자.

이제 관성계 K′에서 관측할 때 막대기의 한끝 A에서 보낸 빛이 막대기의 다른 끝 B에 설치한 거울 C에서 반사되여 다시 A점에 돌아올 때까지 Δt_0만 한 시간이 걸렸다고 하면 기차에 타고있는 관측자에 대해서는 막대기가 멎어있기때문에

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c} \tag{4}$$

이 성립한다. 그러나 관성계 K에서 관측할 때에는 막대기가 속도 v로 운동하기때문에 막대기의 한끝 A에서 보낸 빛이 막대기의 다른 끝 B에 도달할 때까지 빛이 지나간 경로의 길이는 $l + v\,\Delta t_1$로 된다.

여기서 Δt_1은 이때 걸린 시간이다. 한편 빛의 전파속도는 언제나 c로 되기때문에 이 경로의 길이는 $c\Delta t_1$과 같아야 한다. 따라서 $c\Delta t_1 = l + v\Delta t_1$이며 이로부터

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c - v} \tag{5}$$

이 성립한다. 마찬가지방법으로 막대기의 끝 B에 설치된 거울 C에서 보낸 빛이 막대기의 끝 A에 도달하는 시간 Δt_2이

$$\Delta t_2 = \frac{l}{c + v} \tag{6}$$

이라는것을 알수 있다. 식 5, 6으로부터 관성계 K에서 관측할 때 막대기의 한끝 A에서 보낸 빛이 막대기의 다른 끝 B에 설치한 거울 C에서 반사되여 다시 A점에 돌아올 때까지 걸린 시간은

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2l}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (7)$$

이다. 한편 식 4를 식 3의 오른변에 넣으면

$$\Delta t = \frac{2l_0}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (8)$$

으로 된다. 따라서 식 7, 8로부터

$$l = l_0\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad \text{길이의 수축} \quad (9)$$

이 성립한다.

이것은 관측자에 대하여 운동하는 막대기의 길이는 운동방향으로 축소된것으로 관측된다는것을 말한다. 이것을 **길이의 수축**현상이라고 부른다.

길이의 수축현상은 가상적인 현상이 아니라 실제적인 수축현상이다. 이것은 길이가 관측자에 관계없는 절대적인 량이 아니라 관측자에 따라 달라지는 상대적인 량이라는것을 의미한다.

길이의 수축현상은 관측자에 대한 물체의 운동속도가 빛속도에 가까울수록 잘 나타나며 빛속도보다 매우 작을 때에는 거의 나타나지 않는다.

길이의 수축현상은 공간을 재는 척도로서 자의 눈금간격의 수축을 의미하며 결국 공간이 상대적이라는것을 보여준다.

특수상대성리론은 시간과 공간은 서로 밀접히 련관되여있다는것을 보여준다.

실례로 길이의 수축현상은 동시각의 상대성과 관계된다. 땅면에 있는 사람이 동시각이라고 여기는 두 현상도 기차에 타고있는 사람은 동시각이 아니라고 생각한다.

막대기의 길이를 잴 때 땅면에 서있는 사람은 막대기의 량끝을 동시에 측정한다고 생각한다. 그러나 기차에 타고있는 사람은 이 사실을 놓고 땅면에 있는 사람이 B끝을 먼저 보고 다음에 A끝을 본다고 생각한다. 따라서 땅면에 있는 사람이 B끝을 먼저 보고 다음에 A끝을 보는 시간동안에 막대기가 일정한 거리만큼 이동하기때문에 땅면에 있는 사람이 측정한 막대기의 길이가 좀 짧다고 생각한다.

문 제

1. 뉴톤력학과 특수상대성리론에서 시간과 공간에 대한 표상의 본질적인 차이는 무엇인가?
2. 땅에 대하여 8km/s의 속도로 운동하는 인공위성에서 시간이 1min동안 흘러간다면 땅면에서 관측할 때 시간이 얼마나 흘러가는가?
3. 시간의 지연현상에 기초하여 동일한 나이의 두 우주비행사중 한명이 지구를 떠나 우주공간을 비행하고 지구에 다시 돌아올 때 지구에 남아있던 우주비행사보다 더 젊어

진다고 결론할수 있는가?

4. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.

ㄱ) 달리는 기차의 려객차량안에 두 사람이 타고있다. 그중 한 사람에게 두 물리적 현상이 동시에 관측되였다면 다른 사람에게는 동시에 관측되지 않을수 있다.

ㄴ) 서로 다른 관성계에서 막대기의 길이가 다르게 보이므로 진짜 막대기의 길이에 대하여 생각할수 없다.

제 4 절. 상대론적운동방정식

자연계에서 물체들의 운동속도는 각이하다.

빛속도에 비하여 대단히 작은 속도로 운동하는 물체들도 있지만 소립자들과 같이 빛속도에 거의 가까운 속도로 운동하는 물체들도 있다.

이때 빛의 속도 c 에 가까운 속도를 가진 물체의 운동을 **상대론적운동**이라고 부르고 빛속도 c 보다 대단히 작은 속도($v \ll c$)를 가진 물체의 운동을 **비상대론적운동**이라고 부른다.

질량과 운동량

뉴톤력학에서 물체의 질량은 운동과는 관련이 없는 일정한 값을 가진다고 간주한다. 그러므로 일정한 힘이 작용하는 경우에는 물체가 일정한 가속도를 가지고 운동하며 시간이 지남에 따라 물체의 속도는 끝없이 커지게 된다.

? 그러면 물체가 빛속도에 가까운 속도로 운동할 때에도 질량은 속도에 관계없이 일정하겠는가.

특수상대성리론에서는 물체의 질량이 운동과는 관련이 없는 일정한 값으로 되지는 않는다.

특수상대성리론에서는 질량이 운동속도에 다음과 같이 관계된다.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{특수상대성리론에서 질량} \qquad (1)$$

여기서 m_0 은 물체가 정지하고있을 때의 질량으로서 **정지질량**이라고 부른다. 그리고 m은 속도가 v 인 물체의 질량으로서 **상대론적질량**이라고 부른다.

식 1은 물체의 속도가 커짐에 따라 물체의 질량이 증가하며 운동속도가 빛속도에 비하여 훨씬 작게

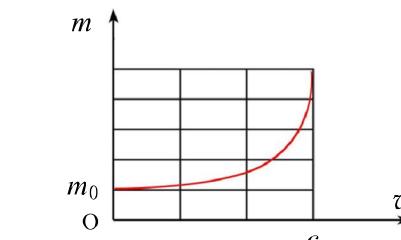



그림 3-7. 질량과 속도사이의 관계

되는 일상생활에서는 물체의 질량이 증가하는 현상이 눈에 띄게 나타나지 않지만 속도가 빛속도에 가까와질 때에는 질량증가현상이 현저하게 나타난다는것을 보여준다.

실제적으로 양성자나 전자와 같은 립자들을 가속시키는 가속장치들에서는 립자들의 속도가 빛속도에 가깝게 되므로 속도의 증가에 따르는 질량의 증가현상이 두드러지게 나타난다. 그러므로 가속장치들에서는 속도의 증가에 따르는 질량의 증가로 인하여 립자의 속도가 빛속도에 가까와질수록 립자를 가속시키기가 점점 어려워진다.

식 1을 리용하면 특수상대성리론에서 운동량은 다음과 같게 된다.

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}\vec{v} \qquad (2)$$

특수상대성리론에서 운동량

여기서 $\vec{p}$ 를 **상대론적운동량**이라고 부른다.

상대론적운동방정식

비상대론적운동의 경우에 운동의 기본방정식은 뉴톤의 운동방정식으로 된다.

뉴톤의 운동방정식 $\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$ 으로부터 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\vec{F}\Delta t = m\Delta\vec{v}$$

이것은 비상대론적운동에서는 물체에 준 힘덩이가 물체의 속도만을 변화시켜 운동량을 변화시킨다는것을 의미한다.

그러나 상대론적운동의 경우에는 물체에 준 힘덩이가 물체의 속도뿐만아니라 질량도 변화시킨다. 따라서 $\vec{F}\Delta t = \Delta\vec{P}$ 로 되여야 한다. 이로부터 상대론적운동에서 운동방정식은 다음과 같다.

$$\vec{F} = \frac{\Delta\left(\frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right)}{\Delta t} \qquad (3)$$

상대론적운동방정식

질량증가현상

우주로케트의 속도 v =10km/s에서 $\sqrt{1-v^2/c^2} \approx 0.999\ 999\ 999\ 44$이라는 사실을 고려하면 그리 크지 않은 속도에서는 속도에 따르는 질량의 증가가 알리지 않는다는것을 알수 있다.

그러나 현대적인 가속장치들에서는 빛속도보다 수십m/s만큼 약간 작은 속도까지 전자를 가속시킬수 있으며 이러한 경우에는 전자의 질량이 2 000배정도 커지게 된다.

식 3은 물체의 속도가 빛속도보다 매우 작은 경우에는 뉴톤의 운동방정식으로 된다. 그러므로 식 3은 속도가 빛속도에 가까와갈 때뿐아니라 빛속도보다 매우 작을 때에도 쓸수 있다.

일정한 힘의 작용밑에 일어난 립자의 운동

뉴톤의 제2법칙에 의하면 크기와 방향이 일정한 힘을 받는 립자의 속도는 시간이 지남에 따라 점점 증가하며 빛속도를 넘어 무한정 커질수 있다.

그러면 상대성리론에서는 립자의 운동속도가 어떻게 되겠는가.

이제 상대론적운동방정식을 풀어 이 사실을 보자.

식 3에서 립자에 작용하는 힘 $\vec{F}$가 크기와 방향이 일정하고 $t=0$인 순간에 립자의 운동량이 $\vec{P}_0=0$이라고 하면

$$\vec{P}=\vec{F}\,t$$

를 얻는다. 운동량의 정의식을 리용하면 이 식은 다음과 같이 적을수 있다.

$$\frac{v}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\frac{F\,t}{m_0} \tag{4}$$

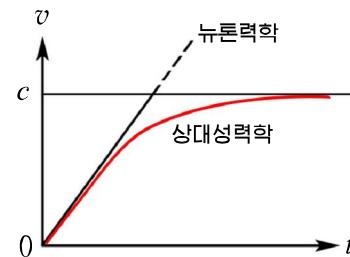
식 4로부터 립자의 속도는

$$v=\frac{\frac{F\,t}{m_0}}{\sqrt{1+\left(\frac{Ft}{m_0c}\right)^2}} \tag{5}$$

로 된다.

식 5로부터 알수 있는것처럼 힘이 가해지는 시간 t가 충분히 작아서 $t \ll m_0c/F$가 성립한다면 립자는 속도 $v=F\,t/m_0$를 가지고 등가속직선운동을 한다. 그러나 힘이 작용하는 시간이 충분히 길어서 $t \gg m_0c/F$가 성립한다면 립자의 속도는 시간이 지남에 따라 계속 커지지만 빛속도를 넘어설수 없으며 $t\to\infty$인 경우에 $v\to c$로 되게 된다.(그림 3-8)

그림 3-8. 립자의 상대론적운동

문 제

1. 정지질량이 10g인 립자의 속도를 $0.99c$ 되게 하면 운동질량이 얼마로 되겠는가?
2. 처음에 멎어있던 전자가 전기마당의 세기 $E=3\times10^7$ V/m인 일정한 전기마당에 의하여 가속된다. 1ns 지나서 전자의 속도를 구하여라.

3. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.

ㄱ) 정지질량이 아주 작은 립자는 힘을 받을 때 쉽게 가속되여 빛속도를 가지고 운동할수 있다.

ㄴ) 어떤 립자든지 운동상태에 관계없이 정지질량이 령이면 운동질량도 령이다.

ㄷ) 속도의 크기가 빛속도에 비하여 대단히 작을 때에는 상대론적운동방정식을 사용할수 없다.

제 5 절. 특수상대성리론에서 에네르기

아인슈타인의 공식

물체에 밖에서 힘을 주어 일을 하면 물체의 속도가 증가하며 동시에 질량도 증가한다. 이것은 에네르기와 질량사이에 련관이 있다는것을 의미한다.

특수상대성리론에서는 질량과 에네르기사이에 다음과 같은 관계가 성립한다는것을 밝혀내였다.

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 \qquad \text{아인슈타인공식} \tag{1}$$

속도의 크기 v가 빛속도에 비하여 아주 작은 경우에 식 1은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$E \approx m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2} \tag{2}$$

이때 $E_0 = m_0 c^2$은 물체가 멎어있을 때($v = 0$일 때) 가지게 되는 에네르기로서 **정지에네르기**라고 부른다. 그러면 상대론적에네르기 E와 정지에네르기 E_0의 차가 운동에네르기로 된다. 운동에네르기를 E_K라고 하면 상대론적에네르기는

$$E = E_0 + E_K \tag{3}$$

와 같이 적을수 있다. 이것은 상대론적에네르기는 정지에네르기부분과 운동에네르기부분으로 나누어볼수 있다는것을 보여준다.

뉴톤력학에서는 정지에네르기라는 개념자체가 없었지만 특수상대성리론에서는 정지에네르기에 대하여 생각하게 된다. 이러한 정지에네르기가 실제적으로 존재한다는것은 π^0메존의 붕괴현상을 통하여 실험적으로 확인할수 있다. π^0메존은 불안정한 립자이다. 이 립자가 붕괴될 때에는 립자가 소멸되면서 전자기파가 복사되게 된다. 이 립자가 붕괴되기 전에 정지질량 m_{π^0}을 가지고 정지상태에 있었다면 붕괴될

때 복사되는 전자기파의 에네르기는 바로 $m_{\pi^0}c^2$과 정확히 일치한다는것이 실험적으로 알려졌다.

립자의 운동속도가 큰 경우에 특수상대성리론에서 얻은 식 1과 3을 리용하여 계산한 립자의 상대론적운동에네르기와 뉴톤력학에 의하여 계산된 립자의 운동에네르기는 크게 차이난다. 그러므로 현대적인 립자가속장치들에서 진공속에서의 빛속도 근방까지 가속된 립자의 운동에네르기를 특수상대성리론에 기초하여 계산한 결과와 뉴톤력학에 의하여 평가한 결과는 크게 차이나게 된다. 이때 뉴톤력학에 의하여 계산된 결과는 실험적사실과 맞지 않는 틀린 결과를 준다. 그러므로 뉴톤력학에 의해서는 현대적인 립자가속장치들에서 제기되는 문제들을 풀수 없는것이다.

식 1에서 빛속도 c는 보편상수이다. 그러므로 식 1로부터 에네르기가 ΔE만큼 변하면 질량은

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} \qquad (4)$$

질량변화와 에네르기변화사이의 관계식

만큼 변한다는것을 알수 있다.

다시말하여 물체의 에네르기가 변하면 그에 대응하여 질량의 변화가 동반된다.

에네르기변화에 대응하여 질량의 변화가 있다는 사실은 질량보존법칙과 에네르기보존법칙이 서로 독립적인 법칙이 아니라 하나로 통일되여있는 법칙이라는것을 말한다.

물체가 밖으로부터 ΔE만 한 에네르기를 받으면 물체의 질량은 식 4에 의하여 계산되는 Δm만큼 질량이 증가하며 물체가 밖에 에네르기를 내여주면 그만큼 물체의 질량이 감소한다. 그러므로 화학반응이나 물체를 가열할 때 물체가 에네르기를 받은것만큼 그의 질량이 증가한다. 그러나 그 변화가 아주 작기때문에 관측되지 않는다.

닫긴계에서 정지질량의 감소는 운동질량의 증가를 가져오며 이것은 정지에네르기가 운동에네르기로 넘어가는 과정이다.

식 4에서 Δm이 정지질량이 운동질량으로 넘어간 몫이라면 ΔE는 새로 생긴 에네르기가 아니라 정지에네르기가 운동에네르기로 넘어간 몫을 의미한다. 보통 정지에네르기는 실생활에서 쓰이지 못하고 운동에네르기가 쓰이게 된다. 이로부터 정지에네르기를 줄여 얻어낸 운동에네르기를 가리켜 에네르기를 얻어내였다고 말한다.

핵반응과정에 질량의 변화에 해당한 거대한 에네르기가 방출된다는 사실도 바로 우에서 설명한 사실과 관련되여있다. 수소폭탄이 폭발하는 경우에는 약 10^{17}J만 한 에네르기가 복사되므로 정지질량은 출발재료의 약 0.1%만큼 변화되게 된다.

에네르기-운동량관계식

식 1의 량변을 두제곱하면 다음의 식을 얻는다.

$$m_0^2c^4 = E^2 - \frac{E^2v^2}{c^2} \qquad (5)$$

운동량에 대한 앞절의 식 2를 두제곱하여 얻은 식

$$v^2 = \frac{P^2}{m_0^2 + \frac{P^2}{c^2}}$$

을 식 5에 넣으면 다음의 결과를 얻는다.

$$E = c\sqrt{P^2 + m_0{}^2c^2} \qquad \text{에네르기-운동량관계식} \qquad (6)$$

식 6을 아인슈타인의 **에네르기-운동량관계식**이라고 부른다.

식 6은 정지질량이 령인 립자는 $E = cP$ 와 같은 에네르기를 가진다는것을 보여준다. 식 1을 고려하면 이러한 립자의 운동량은 $P = mc$ 와 같이 된다는것을 알수 있다. 식 6을 통하여 뉴톤력학에서는 예언할수 없었던 사실인 멎어있는 립자$(P = 0)$는 정지에네르기를 가진다는것을 다시금 확인할수 있다.

문 제

1. 정지질량이 1g이고 속도가 $0.9c$ 인 립자의 에네르기를 구하여라.
2. 립자의 속도가 $v = 0.995c$ 일 때 상대성력학에 의하여 계산된 상대론적운동에네르기에 대한 뉴톤력학에 의하여 계산된 립자의 운동에네르기의 상대오차는 몇%로 되는가?
3. 에네르기의 변화에 대응하는 질량의 변화가 동반된다는 사실은 원리적으로 무엇을 의미하는가?
4. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 정지질량이 령인 립자도 에네르기를 가질수 있다.
   ㄴ) 진공속에서의 빛속도보다 훨씬 작은 속도로 운동하는 립자들로 이루어진 계의 전체 질량은 개별적인 립자들의 질량의 합과 같다고 볼수 있다.

문제. 물체의 속도가 빛속도보다 커질수 없다는것을 증명하여보아라.

방향. 상대론적운동방정식, 상대론적운동량에 대한 지식을 리용하여 물체의 속도가 빛속도를 넘어설수 없다는것을 리론적으로 증명하여라.

복습문제

1. 특수상대성원리를 정식화하여라.
2. 특수상대성리론의 견지에서 관찰할 때 절대강체는 존재할수 있는가?
3. 각 α로 사귀고있는 두개의 직선자가 각각 자의 직선에 수직인 방향으로 속도 $\vec{v}_1, \vec{v}_2$를 가지고 서로 바깥쪽으로 운동한다.
   각 α가 작을 때 두 자의 사귐점의 운동속도는 진공속에서의 빛속도보다 커질수 있는가? 사귐점의 속도가 빛속도보다 커진다면 이 사실은 특수상대성리론과 모순되지 않는가?(그림 3-9)

그림 3-9

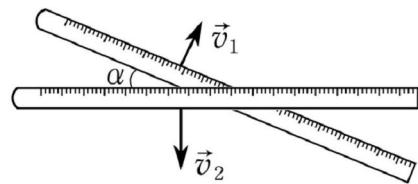
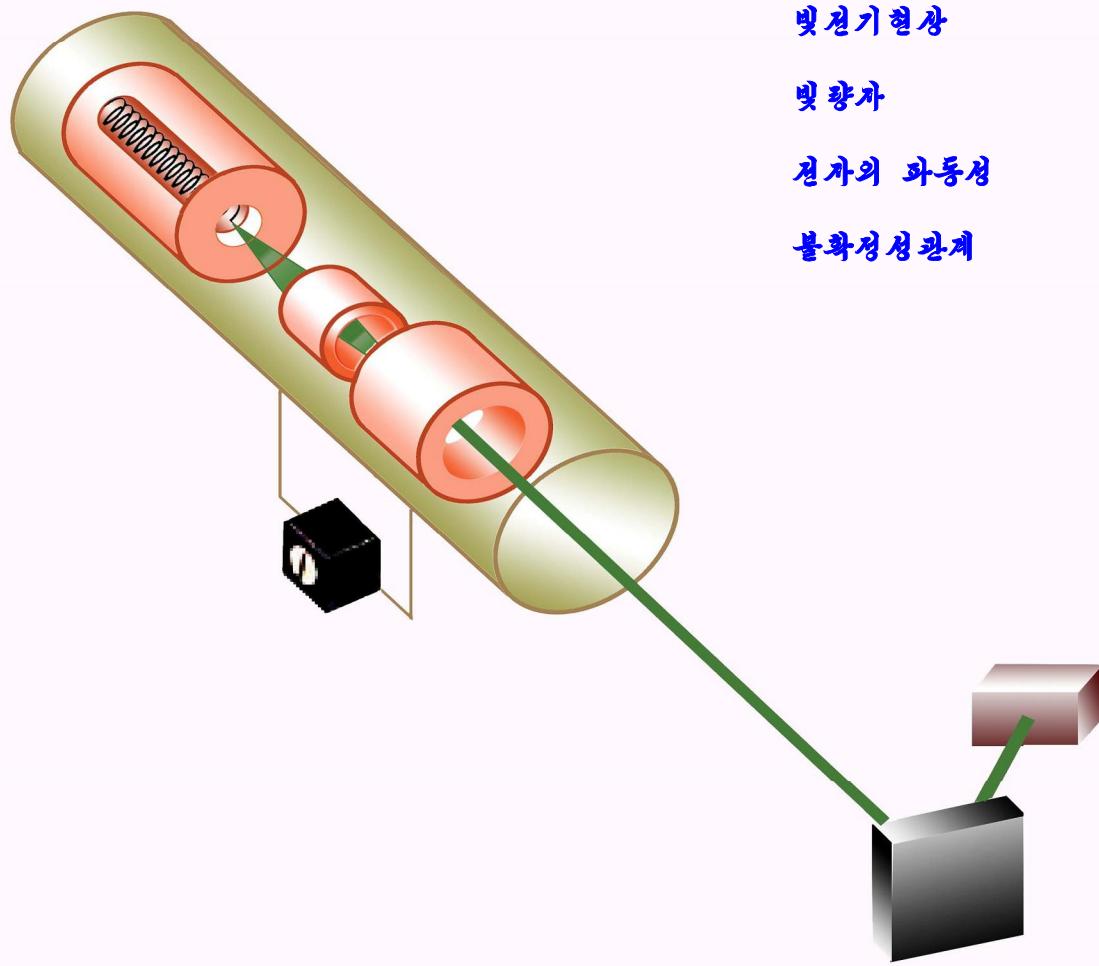
4. 전자의 정지에네르기는 $m_0c^2 = 0.511\text{MeV}$이다. 전자의 속도가 $v = 0.8c$인 경우에 전자의 운동에네르기를 구하여라.

   (답. 0.34MeV)
5. 로케트가 지구에 멎어있는 관측자에 대하여 $0.99c$의 속도로 운동한다. 로케트와 함께 운동하는 계에서 시간이 1a동안 흘러가는 사이에 지구에 있는 계에서는 시간이 얼마나 흘러가겠는가?

   (답. 약 7.1a)
6. 멎어있던 물체가 속도 $v = 0.8c$를 가지고 운동한다면 물체의 밀도는 몇배 변화되는가?

   (답. 약 2.78배 커진다.)
7. 정지질량이 10t인 로케트가 8km/s의 속도로 날 때 질량이 얼마나 커지겠는가?

   (답. 약 3.56mg)
8. 1kg의 물의 온도를 50℃만큼 올릴 때 질량은 얼마나 증가하는가?

   (답. 2.3×10^{-12} kg)
9. 에네르기가 E_0이고 정지질량이 령인 두개의 립자가 있다. 두 립자가 방향이 서로 반대인 운동량을 가질 때와 서로 같은 방향의 운동량을 가질 때 두 립자로 이루어진 계의 질량을 평가하여라.
10. 운동질량은 령이 아니고 정지질량이 령인 립자는 어떤 속도로 운동하는가?
11. 운동질량은 령이 아니고 정지질량이 령인 립자의 운동량은 령으로 될수 있는가?

제 4 장. 물질의 2중성

고전물리학에서는 립자는 립자성만을 띠고 파동은 파동성만을 띤다고 간주하였다. 보통 우리가 생활하는 거시세계에서는 이와 다른 현상을 만날수 없으므로 고전물리학에서는 이러한 표상이 옳은것으로만 생각하였다. 그러나 새로운 실험적사실들은 물질이 일반적으로 립자성과 파동성을 다같이 띤다는것을 보여주고있다. 이것은 미시세계에서 뚜렷이 나타난다.

제 1절. 빛전기현상

공간적으로 작은 자리를 차지하고있는 립자와는 달리 일정한 크기의 공간구역을 차지하면서 공간으로 전파되여나가는 파동의 기본특징은 간섭과 에돌이이다.

일반적으로 파동을 특징짓는 물리적특성량은 파동의 주기 또는 진동수, 파장 그리고 자리각이다. 이때 파동의 세기는 진폭의 두제곱에 의하여 결정된다.

빛의 전파현상은 빛을 파동으로 보면서 요소파간섭의 원리에 기초한 후이겐스의 리론과 빛을 전자기파로 해석한 고전전자기리론에 의하여 원만히 설명된다.

이로부터 고전물리학에서는 빛은 전자기파 즉 파동이며 따라서 파동성만을 띤다고 간주한다.

빛전기현상에 대한 실험법칙

빛에 대하여 고전물리학에서와 다르게 생각하게 한 대표적인 실험적현상의 하나는 빛전기현상이다.

빛전기현상은 다음과 같다.

빛전자관의 구조는 그림 4-1과 같다.

진공으로 된 석영유리관안에 설치된 두개의 금속전극들중의 하나에 빛을 쪼여준다. 이때 빛을 받는 전극이 음극이 되도록 전지를 련결하면 회로에는 전류가 흐르게 된다. 이것은 금속전극에 빛을 쪼일 때 금속겉면으로부터 −부호로 대전된 립자 즉 전자가 떨어져나온다는것을 의미한다.

빛의 작용에 의하여 금속겉면으로부터 전자가 떨어져나오는 현상을 **빛전기현상**이라고 부른다. 이때 떨어져나오는 전자를 **빛전자**라고 부른다.

그림 4-1. 빛전기현상실험

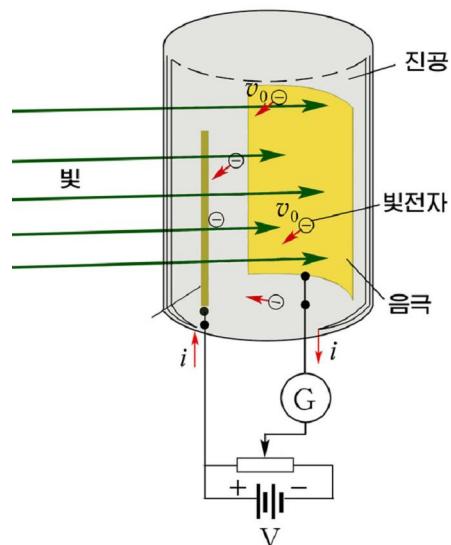
빛전기현상은 어떤 법칙에 따르는가.

먼저 쪼여주는 빛의 흐름과 튀여나오는 빛전자의 수와의 관계를 따져보자.

빛의 흐름은 전등을 빛전자관에 가까이 가져가는 방법으로 변화시킬수 있다. 그리고 전류의 세기는 빛전자의 수에 비례하므로 전류의 세기를 알면 빛전자의 수를 알수 있다.

이 실험에 의하면 전류의 세기는 빛흐름에 비례한다. 이것은 단위시간동안에 튀여나오는 빛전자의 수가 빛흐름에 비례한다는것을 말해준다.

다음으로 빛의 진동수를 변화시키면서 빛전자의 수가 어떻게 변하는가를 따져보자.

그러자면 각이한 색을 가지는 빛을 빛전자관의 음극에 쪼여주면서 전류의 세기를 재야 한다.

이 실험에 의하면 빛의 진동수가 어떤 값보다 더 작아지면 빛흐름이 아무리 세도 빛전자는 전혀 튀여나오지 않는다.

진동수 ν_0 보다 작은 진동수를 가지는 빛을 쪼여줄 때 금속겉면으로부터 전자가 떨어져나오지 않는다고 하면 ν_0 을 **한계진동수**(또는 **림계진동수**)라고 부른다.

이제 튀여나오는 빛전자의 운동에네르기가 어떻게 변하는가를 따져보자.

빛전자들은 다같은 속도를 가지는것이 아니므로 운동에네르기가 큰것도 있고 작은것도 있다. 그러나 빛의 진동수가 일정하면 튀여나오는 빛전자가 가지는 운동에네르기의 최대값이 일정하다는것이 실험에서 알려졌다. 바로 이 최대운동에네르기가 무엇에 관계되는가를 알아보자.

그러기 위하여 그림 4-2와 같이 빛전자관에 거꿀전압을 걸어준다.

거꿀전압이 걸리면 전기마당은 빛전자의 운동을 방해한다. 그러므로 음극에서 튀여나온 빛전자는 운동에네르기를 잃게 된다.

전기마당속에서 빛전자가 잃는 운동에네르기는 eU 와 같다. 여기서 U 는 음극과 양극사이에 걸린 거꿀전압이다.

그림 4-2. 빛전자의 최대운동에네르기결정

이제 음극에서 나올 때 빛전자의 운동에네르기가 $mv^2/2$ 과 같다고 하자. 그러한 에네르기를 가진 빛전자가 거꿀전압을 이겨내고 양극에 도달하자면

$$\frac{mv^2}{2} > eU$$

여야 한다. 만일 음극에서 나온 빛전자들가운데서 운동에네르기가 가장 큰것에 대하여 $mv_{최}^2/2 < eU$ 로 된다면 양극까지 도달하는 빛전자는 없게 된다. 즉 이때 전류가 흐르지 않는다.

전압을 변화시키면서 전류의 세기를 재여보면 그림 4-3과 같다.

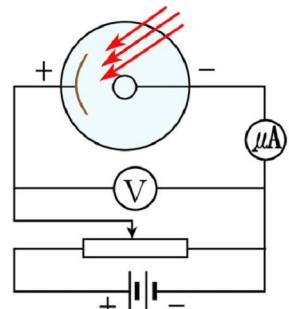
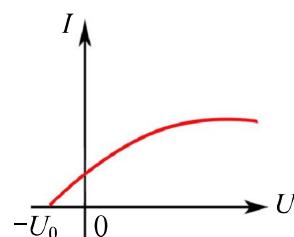
여기서 $U<0$ 인 경우는 바로 거꿀전압이 걸린 경우이다. $U=U_0$ 일 때 $I=0$ 으로 되는데 이때

그림 4-3. 전류 -전압곡선

$$\frac{mv_{최}^2}{2} = eU_0$$

으로 된다. 여기서 $v_{최}$ 는 빛전자의 최대운동속도이다. 그러므로 거꿀전압 U_0 을 재면 빛전자의 최대운동에네르기를 알수 있다.

이 실험에 의하면 빛의 진동수가 클수록 빛전자의 최대운동에네르기가 크다.

실험을 통하여 빛전기현상이 일어날 때 빛전자는 빛을 쪼여주면 거의 순간적으로 금속으로부터 튀여나온다는것을 알수 있다.

실험으로 얻은 빛전기현상에 대한 법칙은 다음과 같다.

첫째로, 단위시간동안에 튀여나오는 빛전자의 수는 빛흐름에 비례한다.

둘째로, 빛의 진동수가 어떤 값보다 작으면 빛흐름이 아무리 세도 빛전자는 튀여나오지 않는다.

셋째로, 빛의 진동수가 클수록 빛전자의 최대운동에네르기가 커진다.

넷째로, 빛을 쪼일 때 빛전자는 거의 순간적으로 튀여나온다.

빛전기현상에 대한 파동론적해석의 난점

빛전기현상이 발견되였을 때 물리학자들은 이 현상을 이상하게 생각하지 않았다. 그들은 빛은 일종의 전자기파이므로 그것을 금속에 쪼일 때 금속에 있는 자유전자들은 전기마당의 작용에 의하여 진동할것이라고 생각하였다. 그러므로 만일 빛이 충분히 세기만 하면 즉 빛의 진폭이 충분히 크기만 하면 빛의 진동수가 어떤 값을 가지는가에는 관계없이 일정한 시간이 지난 후 전자의 진폭이 아주 커지게 되여 금속겉면에서 떨어져나가게 될것이였다.

그러나 빛전기현상에서는 빛의 진동수가 어떤 진동수보다 작은 경우에는 아무리 센 빛을 쪼여주어도 그리고 아무리 오랜 시간 빛을 쪼여주어도 금속겉면으로부터 전자가 떨어져나오지 않는다.

실험에서는 빛이 세지 않아도 한계진동수보다 높은 진동수를 가지는 빛을 쪼여줄 때에는 빛전자가 떨어져나온다는것을 보여준다. 이러한 사실은 빛의 파동성으로는 설명할수 없다.

빛전기현상에서 빛의 파동성에 의하여 설명되지 않는 다른 한가지 사실은 이 현상이 빛을 쪼이자마자 일어난다는것이다.

파동리론에 의하면 빛의 세기가 약할 때에는 빛을 오랜 시간 비쳐주어야만 금속안의 전자가 충분한 에네르기를 얻어 금속밖으로 떨어져나올수 있다. 그러나 실제적으로 빛전기현상에서는 빛의 세기가 약하든 세든 관계없이 금속겉면에 쪼여주는 빛의 진동수가 한계진동수보다 높기만 하면 거의 순간적으로 빛전자가 발생된다.

빛의 파동성에 의해서는 이러한 문제도 설명할수 없다.

문 제

1. 금속겉면에 빛을 쪼일 때 왜 전자가 떨어져나왔다고 생각하는가?
2. 빛전기현상을 빛의 파동성에 의해서만 살펴보면 어떤 결론이 나오는가?
3. 금속겉면에서 빛전자가 떨어져나오면 금속은 어떤 전기를 띠는가? 그리고 이것을 알아보는 간단한 방법은 어떤것이 있는가?
4. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.

ㄱ) 빛전자관의 음극에 쪼여주는 빛흐름을 일정한 값으로 유지하면서 전압을 점점

높여주면 전류의 세기는 계속 커진다.

ㄴ) 붉은색유리를 통하여 음극에 빛을 쪼일 때보다 푸른색유리를 통하여 빛을 쪼이면 음극에서 튀여나오는 빛전자의 속도가 더 커진다.

제2절. 빛 량 자

빛량자가정

물체가 빛에네르기를 련속적으로 복사한다고 생각한 고전적표상에 기초해서는 빛을 완전히 흡수할 정도로 검은 물체(절대흑체)에서의 열복사법칙을 설명할수 없었다. 이 문제를 해결하기 위하여 플랑크는 고전물리학적으로는 생각할수 없는 새로운 가정을 제기하였다.

플랑크는 절대흑체는 빛을 련속적으로가 아니라 일정한 에네르기덩어리를 단위로 하여 복사하거나 흡수한다고 가정하였다. 그리고 복사나 흡수의 단위로 되는 에네르기덩어리를 에네르기량자라고 하고 에네르기량자는 $E=h\nu$ 와 같다고 하였다.

플랑크는 이 량자가설에 기초하여 실험과 잘 일치하는 절대흑체의 열복사능에 대한 법칙(플랑크의 복사공식)을 얻었다.

플랑크의 에네르기량자에 대한 식에서 나오는 보편상수 h 를 **플랑크상수**라고 부른다. 플랑크상수는 $h=6.63\times10^{-34}$ J·s 이다.

아인슈타인은 플랑크의 량자가설에 기초하여 빛전기현상을 관찰하면서 진동수가 ν 인 빛을 마치 에네르기가 $h\nu$ 인 립자들의 모임처럼 생각할수 있다고 가정하였다.

에네르기가 $h\nu$ 인 빛립자를 **빛량자**라고 부른다.

빛량자의 에네르기는

$$E=h\nu=\hbar\omega \quad (\hbar=h/2\pi) \tag{1}$$

빛량자의 에네르기

ω : 빛의 각진동수[s^{-1}]

이다. 한편 빛량자는 빛속도 c 로 운동하기때문에 특수상대성리론에 의하여 빛량자의 에네르기는

$$E=mc^2 \tag{2}$$

로 적을수 있다. 그러므로 식 1과 2를 고려하면 빛량자의 운동질량은

$$m=\frac{h\nu}{c^2}$$

빛량자의 운동질량

로 된다. 빛량자의 정지질량은 령이므로 아인슈타인의 에네르기-운동량관계식과 식 1, 2에 의하여 빛량자의 운동량은

$$P = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$ **빛량자의 운동량**

로 된다.

빛량자는 운동량을 가지므로 빛이 물체의 걸면에 부딪치면 압력을 준다. 이것을 **빛압력**이라고 부른다.

빛량자에 의한 빛전기현상설명

아인슈타인의 빛량자가정에 의하여서는 빛전기현상이 잘 설명된다.

그러면 빛량자가정에 기초하여 빛전기현상을 어떻게 설명할수 있겠는가.

금속걸면에서 전자를 떼내기 위해서는 일정한 일을 하여야 한다. 이 일을 **방출일**이라고 부른다.

몇가지 물질의 방출일

원소	방출일[eV]
알루미니움	4.3
탄소	5.0
동	4.7
금	5.1
니켈	5.1
석영	4.8
은	4.3
나트리움	2.7

에네르기 $h\nu$ 를 가진 빛량자가 금속걸면에 있는 전자와 충돌할 때에는 전자에 자기의 에네르기를 넘겨준다.

빛량자의 에네르기를 흡수한 전자가 금속걸면에서 떨어져나올 때에는 방출일 A만 한 에네르기를 소비한다.

그러므로 $h\nu$ 만 한 에네르기를 가지는 한개의 빛량자에 의하여 떨어져나온 전자(빛전자)의 운동에네르기는

$$E_e = h\nu - A \qquad (3)$$

로 된다.(그림 4-4)

이 식은 다음과 같이 적을수 있다.

$$E_e = \frac{mv^2}{2} = h(\nu - \nu_0) \qquad (4)$$

$$(\nu_0 = \frac{A}{h})$$

여기서 m 은 전자의 정지질량이며 v 는 떨어져나온 전자의 운동속도이다.

빛전기현상이 일어나자면 빛량자를 통채로 흡수한 전자의 에네르기가 방출일보다 커야 한다. 식 3, 4의 조건이 만족되자면 빛의 진동수

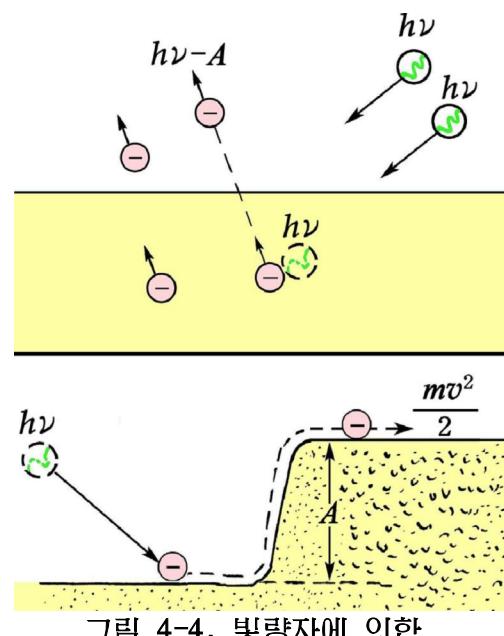



그림 4-4. 빛량자에 의한 빛전기현상설명

가 $\nu_0 = \frac{A}{h}$보다 커야 한다. 그러므로 이 진동수보다 낮은 진동수를 가진 빛은 아무리 오랜 시간 쪼여주어도 즉 $h\nu_0$보다 낮은 에네르기를 가지는 빛량자는 아무리 많아도 빛전자를 발생시킬수 없다. 이것은 빛량자가정에 의하여 파동론적으로 해석되지 않던 한계진동수의 존재문제가 잘 설명된다는것을 의미한다.

다른 한편 빛을 빛량자들의 모임으로 보면 빛이 전자에 쪼여지는 현상은 빛량자가 개별적인 전자와 호상작용하는 과정으로 된다. 이때 금속겉면의 전자는 빛량자의 에네르기를 매우 빨리 흡수한다. 그러므로 빛량자의 에네르기가 $h\nu_0$보다 크다면 빛량자의 에네르기를 흡수한 전자는 금속으로부터 거의 순간적으로 떨어져나오게 된다.

이것은 빛전기현상에서 빛전자가 빛을 쪼여주자마자 순간적으로 튀여나오는 문제도 빛량자가정에 의하여 원만히 설명된다는것을 말한다.

빛의 2중성

이제 빛이 립자성과 파동성을 다같이 띤다는 사실을 두 실틈을 통하여 빛을 입사시킬 때 간섭무늬가 얻어지는 실험을 통하여 살펴보자.

한개의 빛량자라고 생각할수 있는 세기가 아주 약한 빛을 두 실틈을 통하여 순차적으로 입사시킨다. 이때 빛을 수감한 감광판에서는 개별적인 빛량자 하나하나씩의 흔적을 찾아볼수 있다.

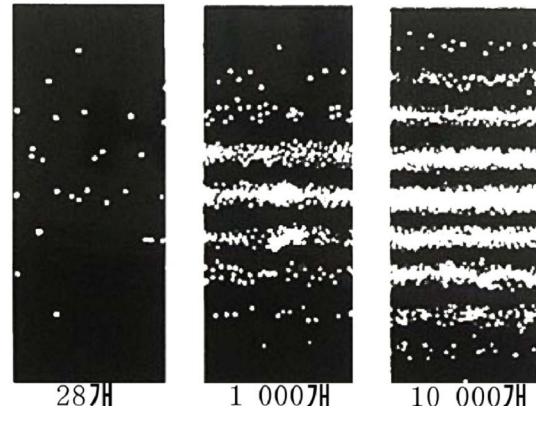
그림 4-5. 빛량자의 흔적

그림 4-5에서 흰 점은 빛량자가 감광판에 닿은 흔적이다. 이것은 빛의 립자성을 똑똑히 보여주고있다.

그렇다면 이 경우에 빛이 파동성을 띤다는것은 무엇을 의미하는가에 대하여 보자.

빛이 두 실틈을 통과한 후 감광판의 어디에 빛량자흔적이 나타나겠는가 하는것은 예측할수 없다. 그러나 많은 흔적이 이루어지는 경우에 그 배치에서는 법칙성이 있다는것을 알수 있다. 많은 흔적이 이루어지는 경우에 흔적이 조밀하게 생기는 위치들은 바로 파동이 두 실틈을 지난 후 간섭될 때 진폭이 커지는 부분과 일치한다. 이것은 흔적들의 전체적인 모임은 파동법칙의 지배를 받는다는것을 말한다. 다시말하여 흔적들의 전체 모임은 파동이 입사한 경우와 같은 간섭무늬를 준다.

우와 같은 사실들은 빛은 일반적으로 립자성과 파동성을 다 띠고있다는것을 보여준다.

이와 같이 빛이 파동성과 립자성을 다같이 가지고있는 성질을 **빛의 2중성**이라고

부른다.

빛이 2중성을 띤다는것은 빛이 물질과 호상작용할 때에는 개별적인 립자(빛량자) 하나하나씩과 같이 작용하지만 이러한 작용의 전체적인 결과는 파동이 작용한것과 같다는것을 의미한다.

문 제

1. 플랑크의 량자가설의 의의는 어디에 있는가?
2. 파장이 0.122μm인 자외선의 빛량자의 에네르기를 구하여라.
3. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 빛이 물질에 흡수될 때에는 빛의 에네르기가 련속적으로 물질에 넘어간다.
   ㄴ) 빛량자 한개가 두 실틈을 통과하여 감광판에 남긴 흔적은 파동이 통과하여 남긴 흔적과 같다.
   ㄷ) 금속에서 전자는 빛량자의 에네르기를 흡수하고 거의 순간적으로 금속밖으로 튀여나온다.

제 3 절. 전자의 파동성

물 질 파

파동성만을 가진다고 생각했던 빛이 립자성도 가진다면 립자성만을 가진다고 생각하는 립자도 파동성을 가질수 있지 않겠는가.

이와 관련하여 드 브로이는 립자는 립자성을 가질뿐아니라 파동성도 가진다는 가정을 제기하였다.

드 브로이는 운동량 P, 에네르기 E를 가지고 공간적으로 작은 자리를 차지하고있는 립자의 운동에는 다음과 같이 결정되는 파장과 진동수를 가지는 파동에 대응하는 파동성을 부여할수 있다고 가정하였다.

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{2\pi\hbar}{P} \qquad \text{드 브로이파의 파장} \tag{1}$$

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \left(\omega = \frac{E}{\hbar}\right) \qquad \text{드 브로이파의 진동수(각진동수)} \tag{2}$$

물질립자의 운동에 대응하는 이러한 파동을 **드 브로이파** 또는 **물질파**라고 부른다. 드 브로이의 가정에 따르면 물질립자는 드 브로이파(물질파)의 파장과 진동수를 가

지는 파동에 해당한 파동성을 나타내야 한다.

단결정에서 전자선의 에돌이실험

실제적으로 물질립자가 파동성을 나타내는가를 확인하기 위하여 에돌이살창으로 간주할수 있는 니켈결정(단결정)에 전자들을 입사시켜 에돌이현상이 일어나는가를 관찰하였다.

니켈결정에서의 전자선(전자속)의 에돌이실험은 다음과 같다.

전자선을 니켈결정의 겉면에 입사시켰다.(그림 4-6) 이때 에돌이무늬가 관측되도록 하기 위하여 전자의 운동에 대응하는 드 브로이파장 λ는 살창주기와 비교될수 있을 정도의 크기를 가지도록 하였다.

그림 4-6. 니켈결정에서 전자선의 에돌이실험장치

만일 전자가 드 브로이파에 해당한 파동성을 실제적으로 나타낸다면 결정겉면들에서 산란된 전자들은 파동이 입사할 때 성립하는 브래그의 공식

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$$

에 의하여 주어지는 각 θ에서 에돌이극대를 보여주어야 한다.(그림 2-55)

한편 정지질량이 m이고 전기량이 e인 전자를 에네르기차가 U인 마당속에서 가속시켰다면 전자의 운동에네르기는 $E=eU$이다. 그리고 실험에서 얻어지는 전자의 속도는 진공속에서의 빛속도보다 훨씬 작으므로 드 브로이파의 파장이 $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{2mE}}$로 된다. 그러므로 전자가 드 브로이파의 파장을 가진 파동과 같은 파동성을 나타낸다면 $\sin\theta = \dfrac{nh}{2d\sqrt{2meU}}$에 의하여 결정되는 각 θ에서 에돌이극대를 보여주어야 한다.

단결정에서의 전자선의 에돌이실험은 이와 일치하는 각 θ들에서 에돌이극대를 보여주었다.(그림 4-7)

그림 4-7. 단결정에서 전자선의 에돌이

결정분말에서 전자선의 에돌이실험

X선을 압축된 결정분말로 이루어진 물체에 입사시킬 때 X선은 브래그공식이 만족하는 각들에서 에돌이극대를 보여준다.

압축된 결정분말에서의 파동인 X선의 에돌이실험을 고려하여 이번에는 X선대신에 전자선을 사용하였다. 이때 전자가 드 브로이파와 같은 파동성을 띤다고 보았

을 때와 일치하는 동심원들로 이루어진 에돌이무늬가 얻어졌다.(그림 4-8)

단결정에서의 전자선의 에돌이실험과 결정분말에서의 전자선의 에돌이실험은 운동하는 전자는 파동성을 띤다는것을 실험적으로 보여주었다.

전자선에 의하여 얻어진 에돌이무늬도 개별적인 전자들의 흔적으로 이루어진다. 그러나 수많은 전자들이 입사하였을 때 얻어지는 흔적들의 전체적인 모임은 파동법칙의 지배를 받는다. 즉 흔적들의 전체 모임은 파동이 입사한 경우와 같은 배치를 가진다. 이러한 사실은 전자는 립자성과 파동성을 다같이 띠고있다는것 즉 2중성을 띠고있다는것을 말해준다.

그림 4-8. X선과 전자선의 에돌이무늬
웃부분-X선의 에돌이무늬
아래부분-전자선의 에돌이무늬

물질립자의 2중성은 전자뿐만아니라 다른 물질립자들에 대해서도 실험적으로 관측되였다. 이것은 물질립자는 일반적으로 립자성과 함께 파동성도 같이 띤다는것을 말해준다.

립자의 파동성은 원자세계와 같은 미시세계에서 본질적이며 주되는 현상으로 나타난다.

⚠ 거시적크기의 물체나 거시적공간규모에서는 물질립자의 파동성이 뚜렷이 관측되지 않는다.

문 제

1. 단결정에서 전자선의 에돌이실험을 진행한 근거는 무엇인가?
2. 압축된 결정분말로 이루어진 물체에서 얻어지는 전자선의 에돌이무늬는 왜 동심원들로 되는가?
3. 질량이 1g이고 속도가 0.5m/s인 물체의 드 브로이파장을 구하여라. 그리고 이로부터 얻어지는 결론을 말하여라.
4. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 전자는 파동성을 가지므로 하나의 전자가 단결정에 입사하는 경우에 에돌이무늬가 나타난다.
   ㄴ) 니켈단결정에 전자선이 입사하는 경우에 얻어진 에돌이무늬는 파동이 입사한 경우와 같다. 이것은 전자가 파동성을 띠고있다는것을 보여준다.

제 4 절. 불확정성관계

불확정성관계

거시세계에서 립자가 가지는 력학적량(례: 자리, 운동량, 에네르기 등)들은 동시에 정확히 확정된다. 그러나 미시세계에서는 동시에 정확히 확정되지 않는다.

미시립자가 가지는 력학적량들가운데서 어떤 두 력학적량들이 동시에 확정되지 않는다는 관계를 **불확정성관계**라고 부른다.

하이젠베르그는 립자의 파동성에 기초하여 실틈을 통과한 전자의 에돌이무늬형성에 대한 사고실험으로 불확정성관계를 밝혔다.

가림판에 있는 실틈을 향하여 운동량이 $\vec{p}=(p,\ 0,\ 0)$인 전자들을 입사시켰다.(그림 4-9)

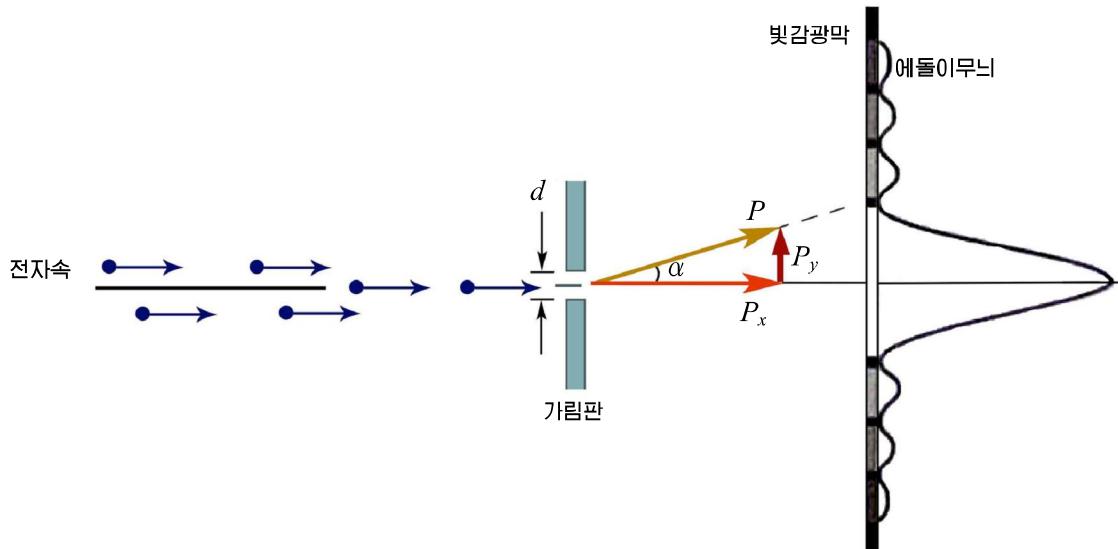



그림 4-9. 불확정성관계에 대한 사고실험

이때 실틈의 너비는 d이다. 전자가 실틈에 도달하기 전에는 전자의 y자리표가 알려져있지 않지만 실틈을 통과할 때에는 전자의 y자리표가 $\Delta y = d$의 범위에서 주어지게 된다.

한편 입사하는 전자는 드 브로이파와 같은 파동성을 띠기때문에 전자가 실틈에 도달하여 통과해나갈 때에는 에돌이현상이 일어나고 따라서 전자의 운동방향이 달라지게 된다. 이러한 경우에 빛감광막우에서 전자가 떨어질 가능성이 제일 크다고 볼 수 있는 점들은 빛감광막에 생긴 중심주극대에 놓여있는 점들이라고 볼수 있다.

전자가 빛감광막우의 중심주극대부분에 떨어질 때 y방향에서 전자의 운동량의 변화범위는

$$\Delta P_y = P\sin\alpha \tag{1}$$

와 같다. 다른 한편 실틈에서 에돌이가 일어날 때 에돌이무늬의 첫 극소점은 $d\sin\alpha = \lambda$ 인 각 α 에서 일어난다. 이러한 사실들로부터 식 1 을 고려하면

$$\Delta P_y = \frac{P\lambda}{d} = \frac{h}{\Delta y}$$

가 성립한다.

실틈으로 입사한 전자들이 실틈을 통과한 후 빛감광막우에 있는 에돌이무늬의 주극대부분이 아니라 다른 부극대부분들에 떨어질 때에는 운동량의 변화가 식 1에서 주어지는 값보다 더 클수 있다. 그러므로 일반적으로

$$\Delta y \Delta P_y \geq h \quad \text{자리표와 운동량사이의 불확정성관계식} \tag{2}$$

라고 쓸수 있다.(그림 4-10)

그림 4-10. 자리표와 운동량사이의 불확정성관계

하이젠베르그의 사고실험으로부터 얻은 자리표와 운동량사이의 불확정성관계식으로부터 에네르기와 시간의 불확정크기 ΔE 와 Δt 들사이의 관계를 얻을수 있다.

원자에 의하여 복사된 빛량자에 대하여서는 운동량의 불확정크기 ΔP_y 와 자리표의 불확정크기 Δy 를 다음과 같이 적을수 있다.

$$\Delta P_y = \frac{\Delta E}{c}, \qquad \Delta y = c\,\Delta t \tag{3}$$

식 3을 식 2에 넣으면

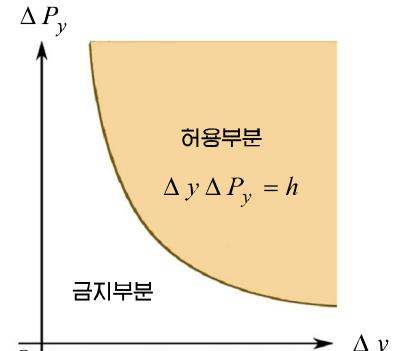
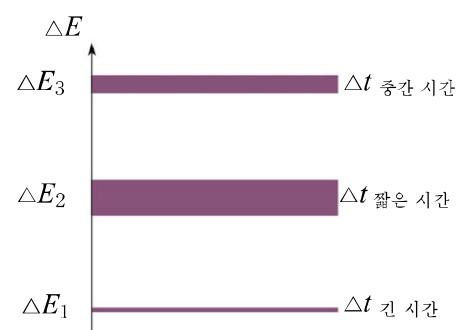
$$\Delta E \Delta t \geq h \quad \text{에네르기와 시간사이의 불확정성관계식} \tag{4}$$

를 얻는다.(그림 4-11)

불확정성관계식들의 의미

자리표와 운동량사이의 불확정성관계식은 자리표와 그에 대응하는 운동량성분은 동시에 정확히 결정할수 없다는것을 보여준다. 식 2에 따라서 자리표와 운동량중 어느 하나를 정확히 결정할수록 다른 하나의 불확정성은 더욱더 커지게 된다.

그림 4-11. 에네르기와 시간사이의 불확정성관계

미시세계에서 자리표와 운동량의 동시적결정에서의 불확정성은 그 어떤 측정오차와 관련되여있는것이 아니라 미시세계에서 나타나는 원리적인 불확정성이다. 이것은 미시세계에서 립자는 동시에 일정

한 자리표와 운동량을 가질수 없다는것을 의미한다.

자리표와 운동량사이에 불확정성관계가 성립하는것으로 하여 미시세계에서는 립자의 정확한 자리길에 대하여 말하는것이 의미를 잃는다.

식 2에서 h가 매우 작으므로 질량이 큰 물체들과 전자선관에서 전자의 운동과 같은 넓은 공간에서 미시알갱이의 운동에는 고전력학을 적용할수 있지만 원자속에서 전자의 운동과 같은 좁은 공간에서의 미시알갱이의 운동에는 고전력학을 적용할수 없다.

에네르기와 시간사이의 불확정성관계식은 에네르기의 크기와 그러한 에네르기를 가지는 시간은 동시에 정확히 결정할수 없다는것을 보여준다. 식 4에 따라서 시간 Δt가 짧아질수록 에네르기의 불확정도는 더욱더 커지게 된다. 미시세계에서 에네르기와 시간사이의 불확정성도 자리표와 운동량사이의 불확정성과 마찬가지로 원리적인 불확정성이다.

미시세계에서 립자가 유한한 수명을 가진다고 하면 립자의 에네르기는 불확정성관계에 의하여 규정되는 불확정성을 가진다. 이것은 유한한 수명을 가지는 립자는 일정한 에네르기를 가진 상태에 계속 놓여있을수 없다는것을 말한다.

문 제

1. 고전물리학에서는 립자의 운동을 관찰하면서 왜 자리표와 운동량사이의 불확정성에 대하여 생각하지 않는가?
2. 자리표와 운동량사이의 불확정성관계식과 에네르기와 시간사이의 불확정성관계식은 어떤 공통점과 차이점을 가지는가?
3. 불확정성관계가 성립하는 두 물리적량의 적은 어떤 단위를 가지는가?

문제. 빛전기현상을 리용한 자동화장치를 설계하고 만들어보아라.

방향.
- 빛전자관, 빛저항, 빛전지와 같은 빛전기현상을 리용하여 만들어진 요소를 가지고 빛에 의하여 동작하는 간단한 자동화장치를 설계하고 만들어보아라.
- 그 과정에 새롭게 알게 된 점과 느낀 점을 적어보아라.

복습문제

1. 빛이 빛량자들의 모임이라고 생각하는것은 무엇에 기초하고있는가?
2. 고전파동론적으로 살펴볼 때와 빛의 립자성에 기초하여 살펴볼 때 빛전기현상에 대한 해석이 어떻게 달라지는가?
3. 빛전기현상에서 월프람전극을 사용한 경우에 한계파장은 $\lambda_{한}=2.75\times10^{-7}$ m이다. 월프람전극에서의 전자의 방출일을 구하여라. 그리고 파장 $\lambda=0.18\mu$m의 빛을 입사시킬 때 전극에서 떨어져나온 전자의 속도와 운동에네르기를 결정하여라.

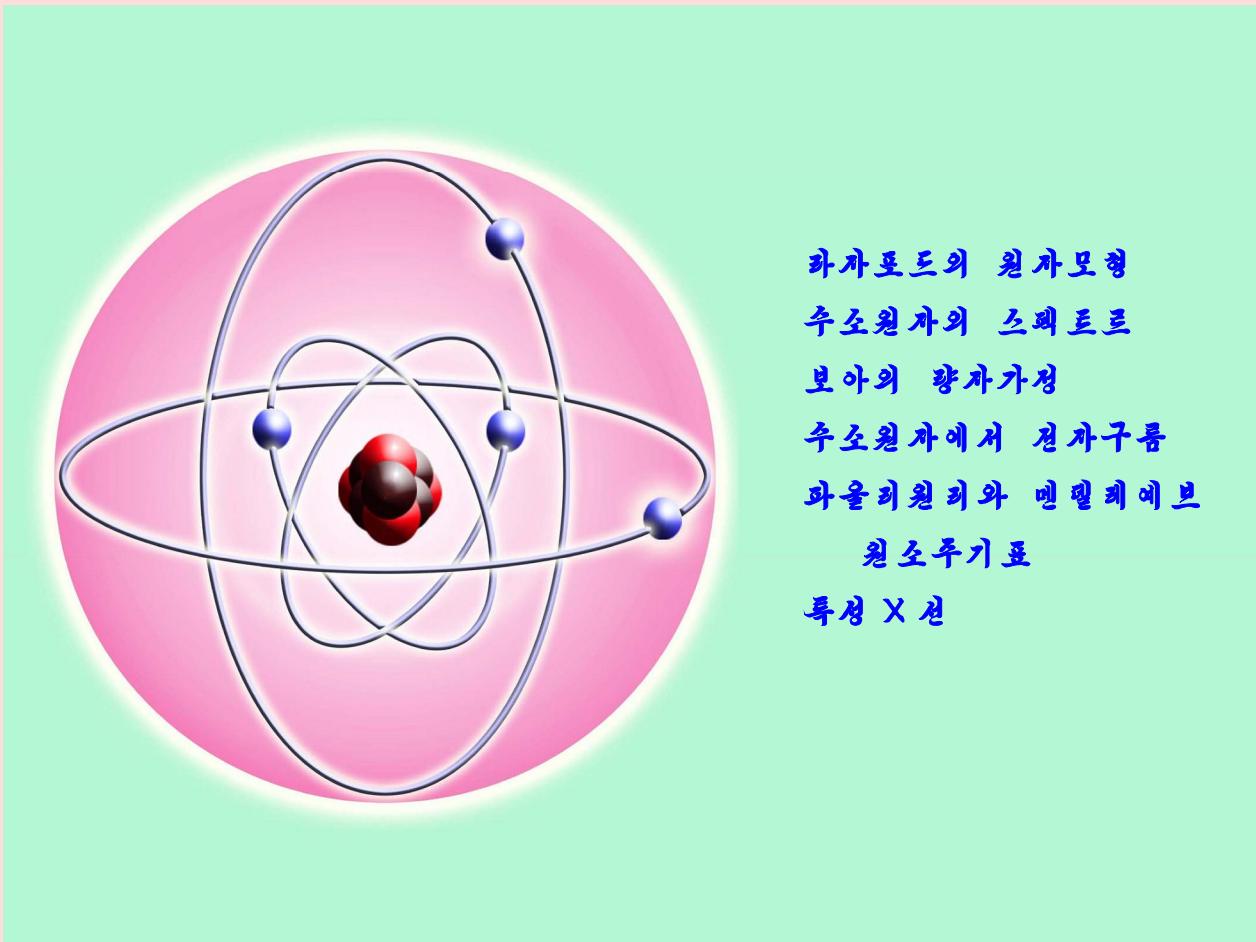
   (답. 7.2×10^{-19}J, 약 9.2×10^{5} m/s, 3.8×10^{-19}J)
4. 파장이 200nm인 자외선을 월프람겉면에 쪼일 때 떨어져나오는 빛전자의 최대운동에네르기는 2.94eV이다. 파장이 160nm인 자외선으로 월프람겉면을 쪼여줄 때 얻어지는 빛전자의 최대운동에네르기는 얼마인가?

   (답. 7.2×10^{-19}J)
5. 에네르기가 2.0×10^{-12}J 인 빛량자의 파장은 얼마인가?

   (답. 9.945×10^{-14}m)
6. 수은의 방출일은 7.27×10^{-19}J이다. 수은에서 빛전기현상이 일어날 때 한계진동수는 얼마인가?

   (답. 1.1×10^{15}s^{-1})
7. 빛량자의 에네르기가 $E=4.4\times10^{-19}$J 인 빛의 파장이 $\lambda=3\times10^{-7}$m 로 되는 매질의 절대굴절률을 결정하여라.

   (답. 1.5)
8. 백금과 세시움의 합금으로 만든 전극을 사용하는 경우에 빛전기현상의 한계파장을 구하여라. 사용된 합금의 방출일은 $A=2.24\times10^{-19}$J 이다.

   (답. 약 8.9×10^{-7}m)
9. 물질의 2중성이란 무엇인가?
10. TV수상관에서 어떤 전자의 운동속도는 4.0×10^{7}m/s이고 질량이 10g인 어떤 철구의 운동속도는 200m/s이다. 드 브로이파의 파장을 각각 구하고 결과를 분석하여라.
11. 한 전자의 속도가 다른 전자의 속도의 2배이다. 어느 전자의 드 브로이파의 파장이 더 짧은가?
12. 운동속도가 같은 수소원자와 은원자가 있다. 어느 원자의 드 브로이파의 파장이 더 짧은가?

제5장. 원자의 구조

고전력학적운동에서는 립자가 립자성만을 나타내며 립자는 임의의 련속적인 값으로 되는 에네르기를 가질수 있다. 그리고 이때 립자의 력학적상태는 자리표와 속도에 의하여 결정된다. 그러나 원자세계에서 립자의 물리적상태, 에네르기는 거시세계와 완전히 다르게 된다.

원자는 핵과 전자들로 이루어져있다. 원자세계와 같은 미시세계에서는 립자가 파동성을 뚜렷이 나타내며 물리적량은 띠염띠염 떨어진 불련속적인 값들을 가진다. 원자에서 전자의 상태는 네개의 량자수에 의하여 특징지어진다.

제 1 절. 라자포드의 원자모형

라자포드의 산란실험

전자가 발견되고 온도를 높이거나 빛을 쪼일 때 물질속에서 전자가 튀여나온다는것이 알려진 때로부터 원자속에 전자가 있다는것이 명백해졌다. 그런데 원자는 전기적으로 중성이므로 원자안에는 전자의 음전기를 지워버리는 양전기를 가진 물질이 있어야 할것이다.

양전기를 띤 물질이 실제로 원자안에 있는가 또 있다면 어떻게 들어있는가, 전자를 가지고있는 원자의 구조는 어떻게 되여있는가.

라자포드는 물질을 이루고있는 원자의 구조를 밝히기 위하여 매우 얇은 금(Au)박판에 의한 α립자(헬리움핵)의 산란실험을 진행하였다.

라디움에서 방출되는 +전기를 띤 질량이 큰 립자인 α립자를 얇은 금박판에 입사시키였다.(그림 5-1)

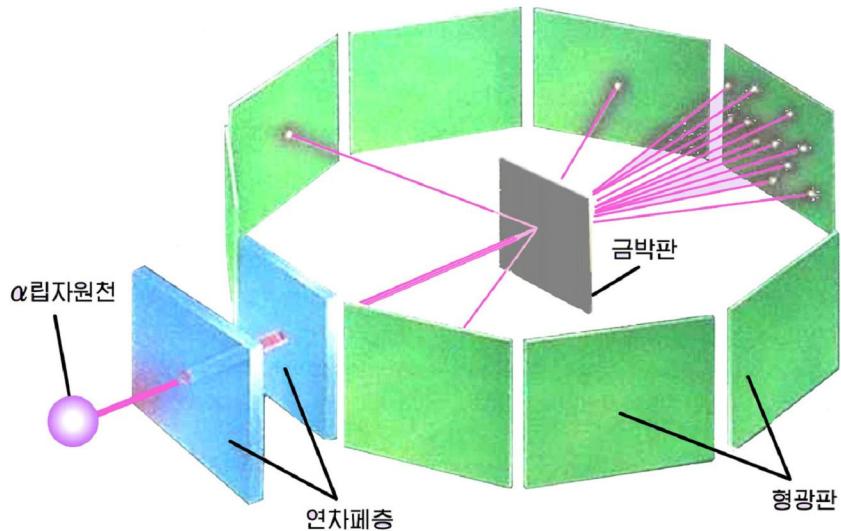
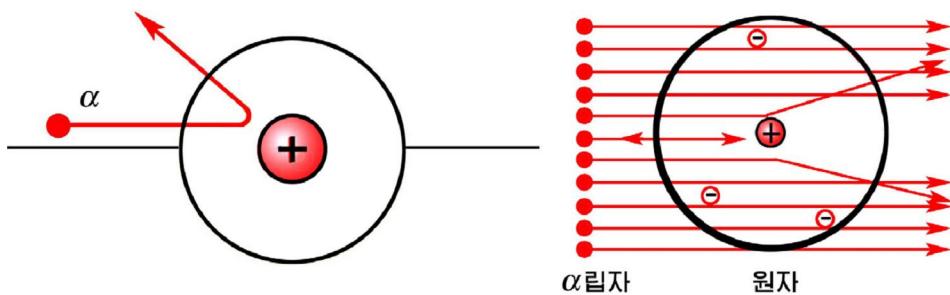



그림 5-1. α립자의 산란실험장치

이때 대다수의 α립자들은 운동방향을 바꾸지 않고 금박판을 그냥 통과하였지만 일부 적은 수의 립자들은 큰 각도로 자기의 운동방향에서 밖으로 편기되여나갔으며 지어는 반대방향으로 산란되여나왔다.(그림 5-2)

그림 5-2. α립자의 산란

라자포드의 α립자산란실험은 무엇을 보여주는가.

질량이 큰 립자인 α립자는 자기보다 질량이 훨씬 작은 립자인 전자와 충돌하여서는 자기의 운동방향을 거의 바꾸지 않는다. α립자가 산란되여 자기의 운동방향을 크게 바꾸자면 우선 질량이 큰 립자부분과 충돌하여야 하며 자기의 운동방향에서 밖으로 편기되거나 지어 반대방향으로 운동방향을 바꾸자면 α립자와 충돌하는 부분이 ＋전기량을 띠여야 한다.

대다수의 α립자들은 금박판을 그냥 통과하고 일부 적은 수의 α립자들만 크게 산란되였다는 실험적사실은 금박판에는 ＋전기를 띤 질량이 큰 부분이 매우 작은 공간에 집중되여있고 그사이 공간에는 질량이 작은 전자들이 놓여있다는것을 보여주고 있다.

이와 같이 라자포드의 α립자산란실험은 원자는 그 중심에 ＋전기를 띠며 원자의 거의 모든 질량이 집중되여있는 매우 작은 립자(이 립자가 원자핵이다.)가 있고 그 주위에는 전자들이 배치되여있는 구조를 가지고있다는것을 보여준다.

실험에 의하면 원자의 중심에 놓여있는 핵의 크기는 10^{-15}～10^{-14}m정도이며 핵의 전기량은 원자의 원자번호가 Z인 경우에 $q=Ze$이다. 여기서 e는 전자의 전기량으로서 전기소량이다.

원자의 태양계모형

라자포드의 α립자산란실험에 의하여 원자의 중심에는 ＋전기를 띠고 원자의 거의 모든 질량이 집중되여있는 핵이 놓여있다는것을 알수 있게 되였다.

한편 핵주위에 있는 전자들은 정지상태에 있을수 없다. 그것은 전자들이 정지상태에 있다면 ＋전기를 띤 핵과 전자사이의 전기적끌힘에 의하여 전자는 핵부분에 끌려가 핵에 떨어져야 하기때문이다. 그러므로 전자는 핵주위에서 부단히 돌아가야 한다.

고전물리학적으로 볼 때 두 질점들사이에 그사이의 거리의 두제곱에 거꿀비례하는 끌힘이 향심력으로 작용하는 경우에는 질점들이 타원 또는 원자리길을 따르는 운동을 할수 있다. 이러한 전형적인 실례가 태양계에서의 천체들의 운동이다.

원자에서도 태양계에서 천체들이 태양을 중심으로 타원자리길을 따라 운동하는것과 류사하게 전기적끌힘을 향심력으로 하여 전자들이 핵주위로 타원 또는 원자리길을 따라서 운동한다고 생각할수 있다. 이렇게 생각하는 모형을 **원자의 태양계모형**이라고 부른다.(그림 5-3)

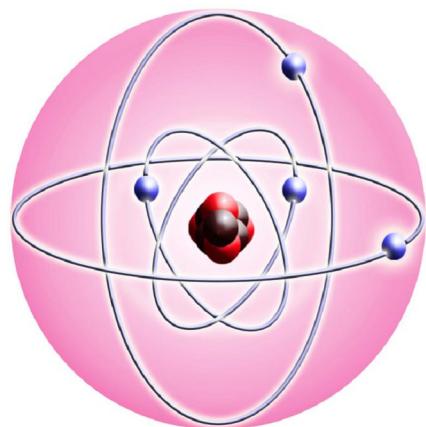



그림 5-3. 원자의 태양계모형

문 제

1. 라자포드의 실험에서 핵에 원자질량의 거의 모두가 집중되여있다는것을 어떻게 알았는가?
2. 라자포드실험을 통하여 핵의 전기량이 +부호를 띤다는것을 어떻게 알았는가?
3. 왜 원자핵주위에서 전자들이 원자리길을 따라 운동할수 있다고 생각하였는가?
4. 다음 문장들의 빈칸에 알맞는 글을 써넣어라.

ㄱ) α립자가 ______ 충돌할 때 운동방향이 ______ 달라진다.

ㄴ) α립자가 ______ 충돌할 때에는 운동방향이 _______ 않는다.

ㄷ) 원자는 _____ 질량의 거의 전부가 ____ 있고 +전하를 띤 _____과 전자로 이루어져있다.

ㄹ) 원자의 _______에서는 중심에 ______ 그 주위로 전자들이 _____ 따라서 운동한다고 생각한다.

제 2 절. 수소원자의 스펙트르

수소원자의 스펙트르에 대한 경험식

원자구조는 직접 눈으로 볼수 없다. 원자구조를 더 구체적으로 밝히려면 원자에 의하여 일어나는 여러가지 현상들을 따져보아야 한다. 많은 학자들이 여러가지 물질들이 내는 빛스펙트르를 조사하는 과정에 원자마다 그에 고유한 스펙트르가 있다는 것을 알아냈다.

실험적으로 얻어진 수소원자의 복사스펙트르는 띠염띠염 떨어진 선스펙트르를 이루었다. 발마는 수소원자에서 복사되는 보임빛복사스펙트르를 계산하기 위한 경험식을 내놓았다.

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{k^2}\right) \qquad (1)$$
$$(k=3,\ 4,\ 5,\ \cdots)$$

여기서 λ는 보임빛의 파장이고 $R=1.097\times10^7\ \mathrm{m}^{-1}$은 리드베르그상수이다. 발마의 공식 1에 의하여 결정된 수소원자의 보임빛복사스펙트르는 실험관측자료와 잘 일치하였다.(그림 5-4)

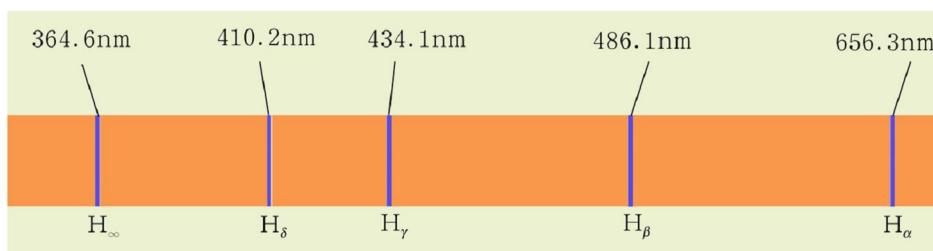



그림 5-4. 수소원자에서 보임빛스펙트르

수소원자의 복사스펙트르에 대한 실험적관측은 수소원자가 보임빛대역의 빛밖에도 자외선대역과 적외선대역의 빛을 복사한다는것을 보여준다. 수소원자가 복사하는 빛의 복사스펙트르는 다음의 하나의 공식으로 적을수 있다.

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right) \qquad \text{수소원자의 스펙트르} \tag{2}$$

$$m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots$$

$$n=m+1,\ m+2,\ \cdots$$

식 2에서 $m=1$은 자외선(라이만계렬스펙트르), $m=2$는 보임빛(발마계렬스펙트르), $m=3$은 적외선(파쉔계렬스펙트르), m=4는 적외선(브라케트계렬스펙트르), m=5는 적외선(푼드계렬스펙트르)에 해당한다.

수소원자의 복사스펙트르는 수소원자에서 나온 빛량자들의 에네르기이다. 그러므로 수소원자의 복사스펙트르는 수소원자의 에네르기상태를 반영한다고 볼수 있다.

수소원자에 대한 고전적취급

수소원자의 에네르기상태를 고전물리학적으로 살펴보자.

수소원자에서는 핵주위에 하나의 전자가 운동하고있다.

원자의 태양계모형에 따라 핵주위로 전자가 원자리길을 따라 운동한다고 하자. 이때 수소원자에서 전자와 핵사이의 정전기적호상작용에네르기는

$$U=-k\frac{e^2}{r}$$

이다. 여기서 e, r는 각각 전자의 전기소량, 핵으로부터 전자까지의 거리이며 $k=9\times10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}$이다.

뉴톤력학에 따라서 전자의 전에네르기는

$$E=\frac{mv^2}{2}-k\frac{e^2}{r} \tag{3}$$

이다. 여기서 m은 전자의 정지질량, v는 원자에서 전자의 운동속도이다.

전자가 반경이 r인 원자리길을 따라서 속도 v로 운동한다고 할 때 핵이 전자에 미치는 전기적끌힘이 향심력의 역할을 하므로 뉴톤력학에 따라서

$$\frac{mv^2}{r}=k\frac{e^2}{r^2} \tag{4}$$

이 성립한다.(그림 5-5) 그러므로 식 3과 4로부터

$$E=-\frac{k\,e^2}{2\,r} \tag{5}$$

으로 된다.

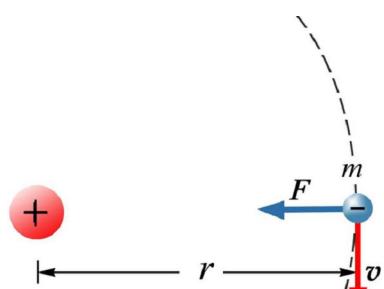



그림 5-5. 수소원자에서 핵과 전자의 전기적호상작용

고전물리학표상에 기초하여 얻은 식 5에서는 고전력학에서 원자리길반경 r 가 임의의 값을 가질수 있기때문에 에네르기 E 도 임의의 값을 가질수 있다. 이것은 수소원자의 스펙트르가 띠염띠염 떨어진 선스펙트르를 이룬다는 사실을 설명하지 못한다.

수소원자의 복사스펙트르에 대한 경험적식은 관측자료와 잘 일치하는 결과들을 주었지만 이 복사공식을 고전물리학적으로는 설명하지 못한다.

원자의 태양계모형에서의 난점

원자의 태양계모형은 라자포드산란실험의 결과를 고전물리학적견지에서 해석하여 생각한 모형이다.

원자의 태양계모형에 따라서 전자들이 원자핵주위로 타원자리길을 따라서 운동한다고 할 때 전자들의 운동은 가속운동으로 된다.

그림 5-6. 원자에서 전자의 전자기파복사

막스웰의 전자기리론에 의하면 가속운동하는 대전립자는 전자기파를 복사하여야 한다.(그림 5-6) 그러므로 원자에서 가속운동하는 전자는 전자기파를 복사하면서 자기의 에네르기를 잃어버려 나중에는 핵에 떨어져야 한다. 이것은 원자의 소멸을 의미하며 원자는 언제나 안정하게 존재한다는 사실과 모순된다. 또한 가속운동하는 전자가 전자기파를 복사하면서 에네르기를 잃게 되면 자리길반경이 작아지고 원자리길운동주기도 작아지게 되여 결국 복사하는 전자기파의 진동수도 련속적으로 변하게 된다. 즉 원자에서 나오는 빛은 련속스펙트르로 되여야 한다. 그러나 수소원자스펙트르에서 보는바와 같이 원자에서 나오는 빛은 불련속스펙트르로 되여있으며 이것은 원자의 태양계모형에 기초한 설명과는 모순된다.

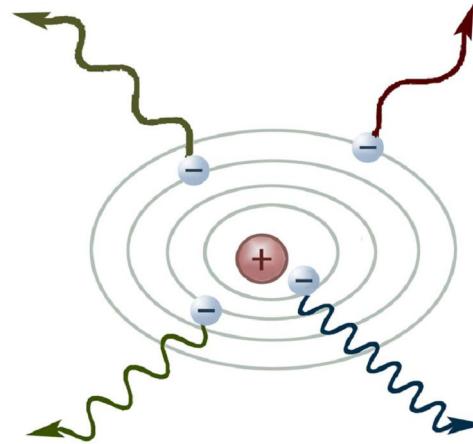
이것은 원자세계와 같은 미시세계에서는 고전물리학적표상이 성립하지 않으며 더우기 원자에서의 전자의 상태는 고전물리학적으로 특징지을수 없다는것을 의미한다.

문 제

1. 수소원자스펙트르의 발마계렬에서 제일 긴 파장과 제일 짧은 파장을 구하여라.
2. 한개 수소원자가 단꺼번에 여러가지 파장의 빛을 내보내는가?
3. 수소원자의 복사스펙트르는 어떻게 이루어지는가?
4. 다음 문장들의 빈칸에 알맞는 글을 써넣어라.

   ㄱ) 수소원자의 복사스펙트르는 ________로 된다.

   ㄴ) 고전물리학적으로는 _______의 복사스펙트르의 ____을 설명할수 없다.

   ㄷ) 원자의 태양계모형은 원자가 ______ 존재한다는 사실을 설명_____.

제 3 절. 보아의 량자가정

보아의 량자가정

보아는 원자의 태양계모형에서 제기되는 난점을 극복하기 위하여 원자에서의 전자상태에 대한 고전물리학적표상에 일련의 새로운 제한조건을 부여하는 두가지 가정을 내놓았다.

첫째로, 원자에서 전자들은 일정한 에네르기 E_n을 가지는 **정상상태**라고 부르는 특수한 량자상태들에만 놓여있다. 정상상태에서 원자는 빛을 복사하지 않는다.

둘째로, 원자에서 빛복사는 전자가 어떤 에네르기 E_n을 가지는 한 정상상태에서 보다 낮은 에네르기 E_m을 가지는 다른 정상상태에로 이행할 때 일어난다. 이때 복사되는 빛량자의 에네르기는 다음과 같다.

$$h\nu = E_n - E_m$$ **빛량자복사에네르기**

원자에서 전자상태와 관련하여 보아가 제기한 두가지 제한조건을 **보아의 량자가정**이라고 부른다.

수소원자에 대한 보아의 초기량자리론

보아는 고전물리학적표상과 량자가정에 기초하여 수소원자에 대한 량자리론을 세웠다. 이 리론을 보아의 **초기량자리론**이라고 부른다.

수소원자에서는 전자가 정상상태에 해당하는 띠염띠염 떨어진 일정한 값들만을 가질수 있다는 사실을 반영하기 위하여 보아는 수소원자문제를 고전적으로 취급하면서 여기에 다음과 같은 가정을 보충적으로 제기하였다.

$$m_e v r = n\hbar \quad (n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots) \qquad (1)$$ **보아의 량자화규칙**

전자의 운동에 해당한 파장이 λ인 파동이 정상파로 되자면

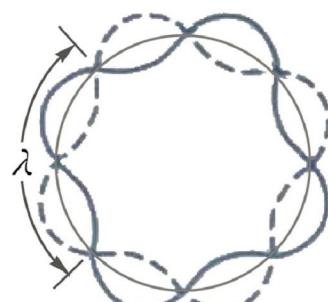
$$2\pi r = n\lambda \quad (n=1,\ 2,\ 3,\ \cdots) \qquad (2)$$

이 성립하여야 한다. 드 브로이파의 파장이 $\lambda = h/P$라는것을 고려하면 식 2는

$$rP = m_e rv = n\hbar$$

로 적을수 있다. 그러므로 보아의 량자화규칙은 원자에서 전자의 운동에 대응하는 드 브로이파의 **정상파조건**으로 해석할수 있다.(그림 5-7)

그림 5-7. 정상파조건

앞절의 식 4와 식 1로부터 량자화규칙이 만족되는 경우에 수소원자에서 전자의

원자리길반경은

$$r_n = \frac{\hbar^2}{k\,m_e e^2} n^2 \qquad (3)$$

과 같이 량자화된다는것을 알수 있다. 여기서 n=1일 때

$$r_B = \frac{\hbar^2}{k m_e e^2} \approx 0.53 \times 10^{-10}\,\mathrm{m}$$

를 **보아의 량자반경**이라고 부른다. 식 3을 앞절의 식 5에 대입하면 수소원자에서 전자의 에네르기준위는

$$E_n = -\frac{m_e k^2 e^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad \text{수소원자의 에네르기준위} \quad (n=1,\ 2,\ 3,\cdots) \qquad (4)$$

과 같이 주어진다. 이때 $E_1 = -13.6\,\mathrm{eV}$이다.

식 4에서 볼수 있는것처럼 수소원자에서 전자는 불련속적인 에네르기를 가진다. 다시말하여 수소원자에서 전자의 에네르기는 량자화된다.

식 4와 보아의 량자가정에 의하여 수소원자에서 복사되는 빛의 진동수는

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{m_e k^2 e^4}{4\pi \hbar^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) \qquad (5)$$

로 된다. 식 5로부터 다음의 식을 얻을수 있다.

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

이 식은 앞절의 식 2와 꼭같다. 이것은 수소원자의 복사스펙트르는 수소원자에 대한 보아의 초기량자리론에 의하여 원만히 설명된다는것을 의미한다.

원자에서 전자의 에네르기상태에 대한 직관적표시

원자에서의 전자의 에네르기상태에 대하여 직관적으로 보여주기 위하여 정상상태에 놓여있는 원자에서 전자의 에네르기들을 에네르기값에 해당한 선들로 표시한 에네르기선도를 리용한다.(그림 5-8)

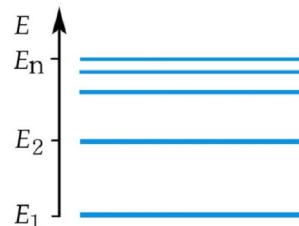



그림 5-8. 원자에서 에네르기선도

에네르기선도에서 매개 수평선들을 **에네르기준위**라고 부른다.

에네르기가 제일 낮은 값에 해당한 에네르기준위 E_1를 원자의 **바닥준위**라고 부르며 바닥준위보다 에네르기가 더 큰 그밖의 다른 준위 E_2, E_3, … 들을 원자의 **려기준위**들이라고 부른다.

수소원자의 경우에 에네르기준위와 스펙트르계렬은 각각 그림 5-9, 5-10과 같다.

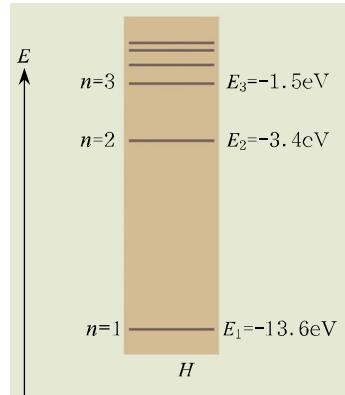



그림 5-9. 수소원자에서 에네르기준위

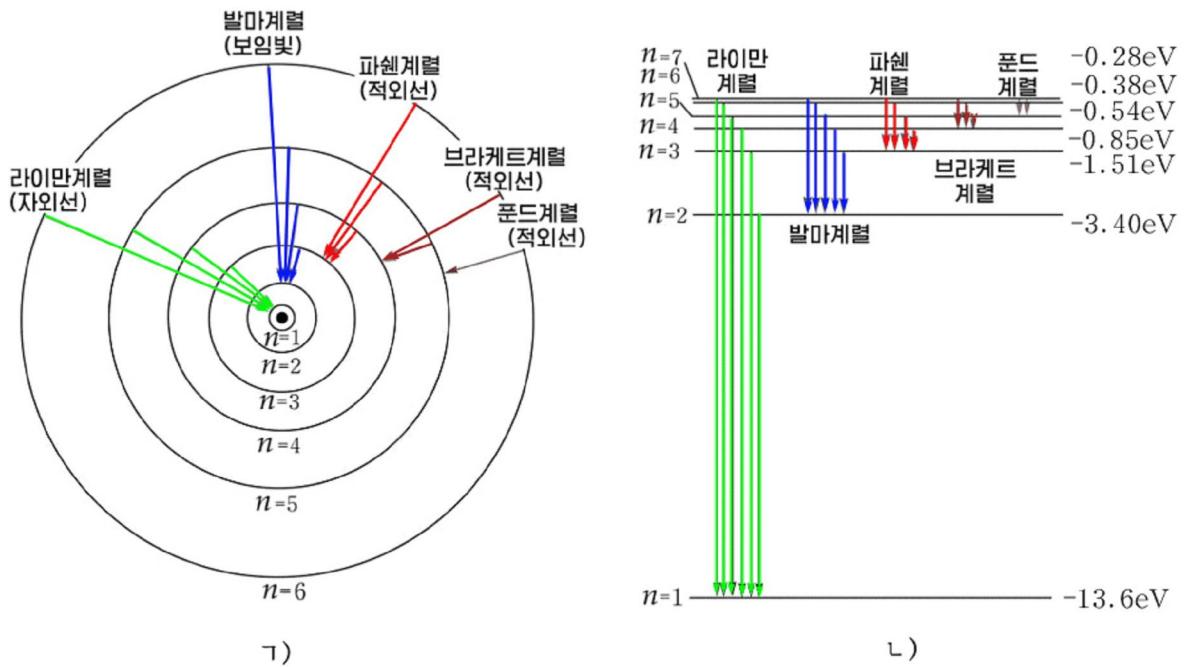
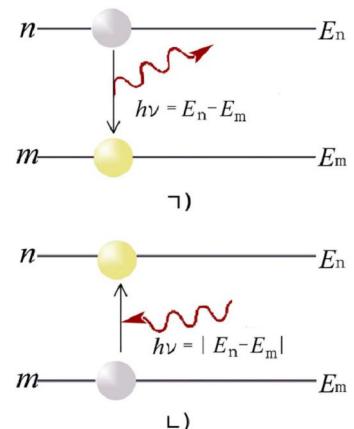



그림 5-10. 수소원자에서 스펙트르계렬

원자에서는 전자들이 보다 높은 려기준위에서부터 보다 낮은 려기준위나 바닥준위에로 이행할 때 에네르기준위들의 차에 해당한 에네르기를 가지는 빛량자가 복사된다. 그리고 원자에서 전자는 바닥준위나 어떤 려기준위에서부터 보다 높은 려기준위까지의 에네르기차에 해당한 에네르기를 받을 때 이에 대응하는 준위에로 이행하게 된다.(그림 5-11)

그림 5-11. 원자에서 빛의 복사와 흡수

려기준위에 놓여있던 전자는 스스로 보다 낮은 려기준위나 바닥준위로 이행할수 있다. 이 과정은 빛량자의 복사를 동반하면서 보통 10^{-9}～10^{-7}s 사이에 일어난다.

보아의 량자가정에 대한 실험적검증

원자에서 정상상태의 존재와 에네르기의 량자화를 보여주는 실험은 프랑크와 헤르쯔에 의하여 진행되였다.

프랑크-헤르쯔실험은 무엇을 보여주는가.

프랑크와 헤르쯔는 3극관안에 수은증기를 채워넣고 음극과 양극사이의 전압-전류특성을 측정하였다.(그림 5-12)

그림 5-12. 프랑크-헤르쯔실험장치

살창전압을 높이면 3극관에서 전자의 운동에네르기는 커지는데 3극관안에서 전자의 에네르기가 4.9eV보다 작은 경우에는 전자들이 수은원자와 충돌하지만 전압의 증가에 따라서 전류가 미끈하게 증가하였다. 그러나 전자의 에네르기가 4.9eV에 이르면 전류는 급격히 작아지면서 수은원자는 복사선을 방출하였다.

이 현상은 전자의 에네르기가 4.9eV보다 작은 경우에는 전자가 수은원자들과 충돌하지만 자기의 에네르기를 수은원자에 넘겨줄수 없으며 수은원자는 오직 4.9eV의 에네르기만을 넘겨받을수 있다는것을 의미한다.

수은원자에 자기의 에네르기를 전부 넘겨준 전자는 양극에 도달하지 못하므로 이때 전류는 급격히 작아지게 되는것이다.

이와 같은 현상은 전자의 에네르기가 4.9eV의 2배로 되는 9.8eV에서도 반복되여 나타났다.(그림 5-13)

그림 5-13. 수은원자의 에네르기준위의 불련속성

이러한 사실은 수은원자에서 전자들은 띠염띠염 떨어진 에네르기값만을 가지는 상태들에만 놓여있을수 있다는것을 보여준다. 다시말하여 프랑크-헤르쯔실험은 정상상태의 존재와 원자에서 물리적량의 불련속성을 실험적으로 보여주었다.

문 제

1. 프랑크-헤르쯔실험에서 전자의 에네르기가 4.9eV일 때 수은원자가 복사하는 복사선의 파장을 구하여라.
2. 핵주위로 원자리길을 따라 운동하는 전자가 복사하는 전자기파의 진동수에 대한 고전전자기론적견해와 보아의 량자가정에 기초한 견해는 어떻게 차이나는가?
3. 수소원자에서 n=2, 3준위에 있던 전자가 n=1인 준위로 이행할 때 복사되는 빛의 진동수를 계산하여라.
4. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.

ㄱ) 보아의 초기량자리론은 수소원자에서 전자들이 띠염띠염 떨어져있으며 일정한

반경을 가지는 원자리길들을 따라서 운동한다는 결과를 준다.

ㄴ) 보아의 량자가정은 원자에서 원자리길을 따라서 가속운동하는 전자가 전자기파를 복사한다는 사실과 모순되지 않는다.

ㄷ) 수소원자의 에네르기준위는 바닥준위에서 려기준위에로 올라가면서 점점 작아진다.

제 4 절. 수소원자에서 전자구름

원자에서 전자상태를 결정하는 량자수들

원자에서 전자들은 핵주위로 자리길운동을 하므로 자리길각운동량을 가진다.

원자에서 띠염띠염 떨어진 불련속값을 가지는(량자화된) 전자의 각운동량의 크기 L은 다음과 같다.

$$L = \hbar\sqrt{l(l+1)} \quad \text{원자에서 전자의 각운동량} \quad (l = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \cdots) \tag{1}$$

이때 자리길각운동량을 규정하는 수 l을 **자리길량자수** 또는 **부량자수**라고 부른다. 어떤 선택된 방향에 대한 각운동량벡토르의 사영성분 L_Z는 다음과 같다.

$$L_Z = m\hbar \quad \text{원자에서 전자의 각운동량사영성분} \quad (m = -l,\ -l+1,\ \cdots,\ 0,\ \cdots,\ l-1,\ l) \tag{2}$$

식 2에서 전자의 각운동량사영성분을 규정하는 령을 포함하는 정의 및 부의 옹근수 m을 **자기량자수**라고 부른다.

수소원자에서 전자의 에네르기에 대한 식

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad (n = 1,\ 2,\ 3,\ \cdots)$$

에서 볼수 있는것처럼 전자의 에네르기는 옹근수 n에 따라 결정된다. 이때 원자에서 전자의 에네르기를 규정하는 령이 아닌 정의 옹근수 n을 **주량자수**라고 부른다.

주량자수 n과 자리길량자수 l사이에는

$$l \le n-1$$

과 같은 제한조건이 성립한다. 이로부터 자리길량자수는 $l = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \cdots,\ n-1$인 령을 포함하는 정의 옹근수들을 취한다.

자리길운동과 관련없이 전자가 가지게 되는 내부적인 고유각운동량을 **스핀**이라고 부른다.

원자에서 전자의 스핀의 크기 S는 다음과 같이 결정된다.

$$S = \hbar\sqrt{s(s+1)} \quad \text{원자에서 전자의 스핀} \quad \left(s=\frac{1}{2}\right) \tag{3}$$

식 3으로부터 전자의 스핀의 크기는 $S=\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$와 같다. 어떤 선택된 방향에 대한 스핀의 사영성분 S_Z는 다음과 같다.

$$S_Z = m_S\,\hbar \quad \text{전자스핀의 사영성분} \quad \left(m_S=+\frac{1}{2},\quad -\frac{1}{2}\right) \tag{4}$$

식 4에서 전자의 스핀(고유각운동량)의 사영성분을 규정하는 수 m_S를 **스핀량자수**라고 부른다.

이상과 같이 원자에서 전자의 상태는 네개의 량자수 n, l, m, m_S에 의하여 결정된다.

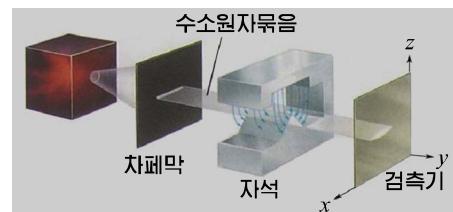
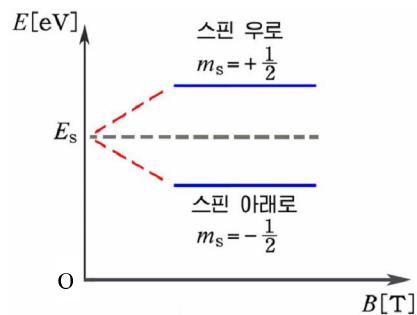
스핀의 존재에 대한 실험적사

바닥상태에 놓여있는 수소원자들을 불균일한 자기마당속으로 입사시킬 때 수소원자들은 서로 반대쪽으로 동일한 거리만큼 갈라진다.(그림 5-14)

그림 5-14. 스핀존재에 대한 실험장치

바닥상태(n=1)에서 수소원자는 자리길운동과 관련된 각운동량을 가지지 않는다는것을 고려하면 불균일한 자기마당과 호상작용하여 수소원자들을 갈라져 운동하게 하는 자기모멘트를 발생시키는 각운동량은 자리길각운동량이 아니라는것을 알수 있다. 그러므로 수소원자에서 전자는 자리길운동과 관련이 없는 내적인 고유각운동량을 가져야 한다.

그림 5-15. 스핀과 자기마당의 호상작용

불균일한 자기마당속에서 수소원자들이 서로 반대쪽으로 동일한 거리만큼 갈라져 분포되였다는 사실은 전자의 고유각운동량이 크기는 같고 부호가 반대인 두가지 불련속값을 가진다는것을 의미한다.(그림 5-15)

그러면 원자에서 전자의 상태를 어떻게 표시하겠는가.

원자에서 전자의 자리길량자수가 각각 $l=0$, 1, 2, 3, 4일 때 이에 대응하여 전자는 s, p, d, f, g 상태에 있다고 말한다. 그리고 주량자수가 n, 자리길량자수가 l인 전자의 상태는 주량자수에 해당한 수자를 먼저 쓰고 그다음에 자리길량자수에 해당한 문자를 써서 표시한다. 실례로 $n=1$, $l=0$인 전자상태는 $1s$, $n=2$, $l=1$인 전자상태는 $2p$로 표시한다.

전자구름과 전자들의 분포

그러면 원자안에서 전자들은 어떻게 분포되여있는가.

바닥상태에 있는 수소원자를 오랜 시간동안 사진 찍으면 이때 얻어지는 전자위치들의 분포는 구름모양을 띤다.

수소원자를 오랜 시간 사진 찍어 얻은 전자위치들의 분포는 다음과 같이 해석할 수 있다. 매 순간마다 찍은 전자위치를 투영필림에 검은 점으로 표시하고 이렇게 하여 얻어진 많은 투영필림들을 겹쳐놓는다. 그러면 전자들이 많이 놓인 부분들은 점들이 조밀하게 배치되여 색갈이 진해지고 보다 적게 놓인 부분들은 점들이 덜 조밀하게 배치되여 색갈이 보다 연해지며 또 전자들이 전혀 놓이지 않은 부분들은 색갈이 전혀 없게 될것이다. 이렇게 하여 얻어진것이 전자들의 분포를 보여주는 구름모양의 사진인것이다. 이것을 **전자구름**이라고 부른다.

전자위치들의 분포가 구름모양을 띤다는것은 전자자체가 구름모양을 띤다는것이 아니다.

그림 5-16. 전자들의 동경분포

그림 5-16과 같은 원자에서 전자위치의 분포사진을 통하여 수소원자에서 전자들의 동경분포(원자중심으로부터 전자위치까지의 거리 r에 따르는 전자위치의 분포 P)를 알 수 있다.

원자에서 전자들은 일정한 자리길반경을 가지지 않으며 동경방향으로 일정한 분포를 가지고 운동한다.

주량자수가 증가함에 따라 전자들이 가장 많이 놓이는 위치는 원자중심으로부터 점점 멀어진다. 원자에서 구름모양을 가지는 전자들의 분포상태는 전자의 량자수들에 따라 다르다.(그림 5-17)

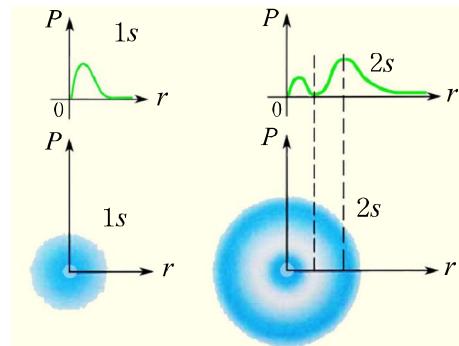
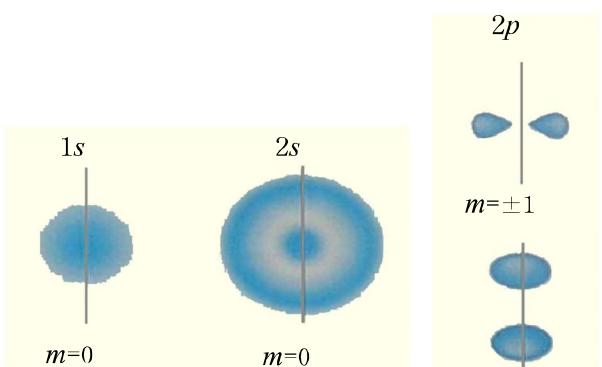



그림 5-17. 량자수들에 따르는 전자구름의 모양

문 제

1. 립자의 상태를 특징짓는데서 거시세계에서와 미시세계에서의 차이점은 무엇인가?
2. 어두운 밤에 사진기의 로출시간을 오래 주고 시내에서 조명등을 켜고 달리는 자동차를 사진 찍을 때 얻어지는 사진을 실례로 전자구름을 해석하여라.
3. 원자에서 주량자수 n이 주어진 값을 가지는 전자들은 어떤 량자수들을 가질수 있는가? 그리고 량자수들의 조(n, l, m, m_S)의 총수는 몇개인가?
4. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 전자는 구름모양을 띠고있다.
   ㄴ) 원자에서 전자의 상태는 자리표와 운동량에 의하여 결정할수 있다.
   ㄷ) 전자는 운동할 때 일정한 자리길반경을 가지지 않는다.

제 5 절. 파울리원리와 멘델레예브원소주기표

원자에서 전자층과 분층

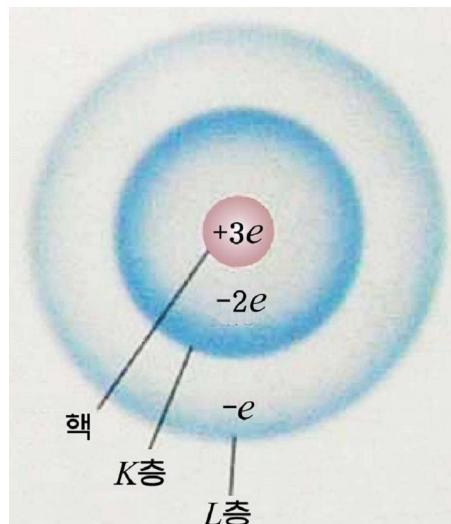
원자에서 전자들은 기본적으로 주량자수 n에 의하여 규정되는 일정한 층을 이루고있다. 다시말하여 원자에서 동일한 주량자수를 가진 전자들은 기본적으로 같은 층안에 놓여있다.(그림 5-18)

그림 5-18. 리티움원자에서 전자층

이때 주량자수 $n=1, 2, 3, 4, 5, \cdots$에 해당한 전자층을 각각 K, L, M, N, $\cdots$**전자층**이라고 부른다.

사실 원자에서의 호상작용이 핵과 전자사이의 호상작용으로만 된다고 간주하는 경우에는 핵으로부터 전자까지의 거리나 전자의 에네르기가 주량자수에만 관련되며 주량자수가 커짐에 따라서 핵으로부터 전자까지의 거리가 점점 커지게 된다. 그러므로 이러한 경우에 원자내부에 있는 전자들은 주량자수만에 의하여 구분되는 층을 형성하게 되는것이다.

그러나 원자에서 전자의 수들이 많아짐에 따라 전자들사이의 호상작용이 무시할수 없게 나타나며 이로 하여 핵으로부터 전자까지의 거리나 전자의 에네르기가 주량자수뿐아니라 자리길량자수에도 관계된다. 이로 하여 엄격히 보면 원자에서 어떤 주량자수에 대응하는 전자층에는 1만큼 더 큰 주량자수를 가지는 전자들이 부분적으로 포함될수 있다.

원자에서 하나의 전자층안에는 허용되는 자리길량자수를 가지는 여러개의 전자들이 놓여있을수 있다. 이때 자리길량자수 l에 의하여 구분되는 전자층의 부분들을 **분층**이라고 부른다.

파울리의 원리

원자에서 전자의 량자상태를 특징짓는 량자수들은 n, l, m, m_S들이다. 이 량자수들중에서 량자수 n, l, m들은 전자의 외부적운동상태를 규정하는 량자수들이며 m_S는 전자의 내부적상태를 특징짓는 내부량자수이다.

여러개의 전자들을 가지는 복잡한 원자에서 전자들의 내부적상태를 특징짓는 내부량자수인 스핀량자수의 크기는 $|m_S|=1/2$로서 다같다. 그리고 원자에서 전자들은 항상 호상작용하는 상태에 있다.

이때 원자에서 량자수 n, l, m, m_S들에 의하여 규정되는 한 량자상태에는 하나의 전자밖에 있을수 없다. 이 사실을 **파울리의 원리**라고 부른다.

원자에서 전자배치

원자에서 전자들은 에네르기적으로 유리한 상태에서부터 채워진다. 만일 전자들사이의 호상작용을 무시하고 전자가 핵이 미치는 전기적호상작용만을 받는다고 하면 에네르기준위는 주량자수 n이 커짐에 따라 점점 증가하게 된다. 그러므로 이 경우에 원자에서 전자들은 K, L, M, N, …전자층순서로 채워지게 된다.

파울리원리에 의하여 한개의 량자상태에는 한개의 전자만이 놓여있을수 있으므로 매개 전자층에 놓이는 전자의 수와 채워지는 순서는 규정되게 된다.

주량자수가 $n=1$인 K전자층에는 자리길량자수가 $l=0$인 하나의 분층이 있으며 이 분층에는 자기량자수가 $m=0$이고 스핀량자수가 $m_S=+\frac{1}{2}$ 또는 $m_S=-\frac{1}{2}$인 두가지 상태가 존재한다. 그러므로 K전자층에는 2개의 전자가 놓일수 있다.

주량자수가 $n=2$인 L전자층에는 자리길량자수가 $l=0$, 1인 두개의 분층이 있다.

$l=0$인 분층에는 자기량자수가 $m=0$이고 스핀량자수가 $m_S=+\frac{1}{2}$ 또는 $m_S=-\frac{1}{2}$인 두가지 상태가 존재한다. 그리고 l=1인 분층에는 자기량자수가 m=-1, 0, 1인 값을 가질수 있다. 매개 m에는 스핀량자수 $m_S=+\frac{1}{2}$ 또는 $m_S=-\frac{1}{2}$인 두가지 상태가 존재한다. 그러므로 L전자층에는 전자가 $l=0$인 분층에 2개, $l=1$인 분층에 6개 하여 총 8개의 전자가 놓일수 있다. 이와 같은 방법으로 하여 주량자수가 n인 전자층에는 전자가

$$\sum_{l=0}^{n-1}(2l+1)\cdot 2=2n^2$$

개만큼 놓인다. 그러므로 원자에서 K, L, M, N, … 전자층들에는 전자들이 각각 2,

8, 18, 32, …개씩 배치된다.

전자층들에 놓이는 전자수

n	l	m	표시기호	상태수	전자층
1	0	0	$1s$	2	K
2	0 1	0 -1, 0, 1	$2s$ $2p$	2 6 } 8	L
3	0 1 2	0 -1, 0, 1 -2, -1, 0, 1, 2	$3s$ $3p$ $3d$	2 6 10 } 18	M
4	0 1 2 3	0 -1, 0, 1 -2, -1, 0, 1, 2 -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3	$4s$ $4p$ $4d$ $4f$	2 6 10 14 } 32	N

전자들사이의 호상작용을 무시하고 전자가 핵이 만드는 힘마당속에서 운동한다고만 보는 경우에는 원자에서 전자들이 주량자수 n이 작은 전자층에서부터 채워지며 한 전자층안에서는 자리길량자수 l이 작은 분층에서부터 채워지게 된다.

멘델레예브원소주기표

화학원소들의 화학적성질은 맨바깥전자층전자(원자핵으로부터 제일 바깥쪽에 놓이는 전자)들에 의하여 결정된다.

원자에서 전자수가 증가할 때 맨바깥전자층전자들은 량자수들에 따라서 규칙적인 법칙성을 가지고 하나씩 증가하게 된다. 그러므로 원자의 전자수가 늘어남에 따라 원자에서의 전자배치는 주기적으로 반복되게 된다.

한편 동일한 자리길량자수 l을 가지며 맨바깥전자층에 같은 전자수들을 가지는 원소들은 류사한 화학적성질을 가진다.

원자에서 전자수가 증가하는데 따라 원소들을 배치하면서도 류사한 화학적성질을 가지는 원소들이 한 수직선을 따라 놓이도록 배치해놓을수 있다. 이것이 멘델레예브원소주기표이다.

그러므로 **멘델레예브원소주기표**란 화학원소들을 성질이 규칙적이며 주기적으로 변하는데 따라 합리적으로 분류하여놓은 표를 말한다.(그림 5-19)

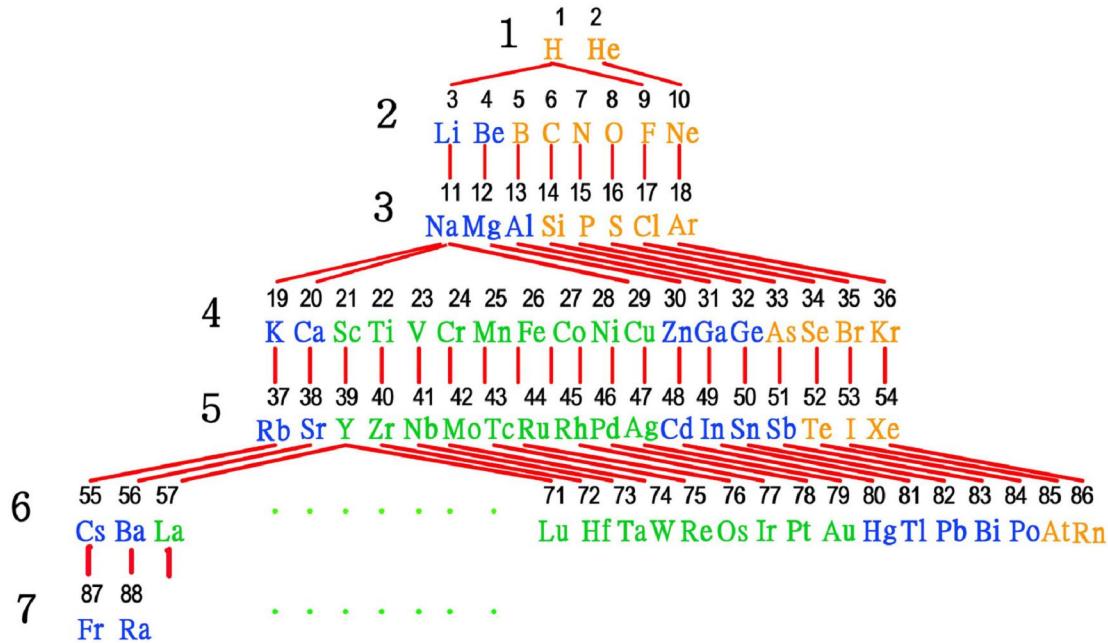



그림 5-19. 멘델레에브원소주기표

원자에서 분층에 놓이는 전자들의 배치는 처음에 주량자수를 해당한 수자로 쓰고 다음 자리길량자수에 해당한 상태표시기호를 쓴 다음에 그 상태표시기호의 오른쪽 어깨우에 그 분층에 놓이는 전자의 수를 적는 방식으로 표시한다.

원자에서 차례로 놓이는 전자들의 전체적인 배치는 전자들이 채워지는 순서로 분층의 전자배치표시를 련달아 적는 방법으로 나타낸다.

실례로 표에서 알수 있는것처럼 알루미니움(Al)에서 13개 전자의 배치는 $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^1$로 표시한다.

그런데 표를 보면 우에서 설명한 전자배치상태와 약간씩 차이나는것을 알수 있다.

실례로 우에서 설명한 전자배치규칙에 의하면 칼리움(K)에서 19개의 전자들이 $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^1$와 같이 배치되여야 하지만 실제로는 $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 4s^1$로 배치되여있다.

원자에서 전자배치

원소기호	원자번호	전자배치
H	1	$1s^1$
He	2	$1s^2$
Li	3	$1s^2 2s^1$
Be	4	$1s^2 2s^2$
B	5	$1s^2 2s^2 2p^1$
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
N	7	$1s^2 2s^2 2p^3$
O	8	$1s^2 2s^2 2p^4$
F	9	$1s^2 2s^2 2p^5$
Ne	10	$1s^2 2s^2 2p^6$
Na	11	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$
Mg	12	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$
Al	13	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^1$
Si	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
P	15	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$
S	16	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^4$
Cl	17	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$
Ar	18	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$
K	19	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$
Ca	20	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2$

이것은 칼리움원자에서는 실제적으로 $3d$ 분층의 에네르기가 $4s$분층의 에네르기보다 더 크다는것을 의미한다. 그것은 실제원자에서는 전자들사이의 호상작용이 있으며 그것은 원자의 전자수가 커짐에 따라 더 큰 영향을 나타낸다는 사정과 관련되여있다. 그러므로 실제 여러 전자를 가지는 원자에서는 에네르기가 주량자수 n뿐아니라 자리길량자수 l에도 관계되며 이로 인하여 주량자수가 보다 큰 이웃하고있는 분층의 에네르기가 주량자수가 작은 린접분층의 에네르기보다 작아질수 있는것이다.

문 제

1. 리티움(Li)과 나트리움(Na)의 화학적성질이 비슷한 리유를 설명하여라.
2. 린(P)의 전자배치를 표시하여라.
3. 에네르기가 주량자수 n뿐아니라 자리길량자수 l에도 관계되는 원자들을 실례를 들어 지적하여라.
4. 다음 문장들의 빈칸에 알맞는 글을 써넣어라.
   ㄱ) ___에 의하여 원자에서 량자수 n, l, m이 주어진 분층에는 ___ 전자가 놓일수 있다.
   ㄴ) 실제 원자에서는 전자들이 반드시 주량자수가 ___ 순서로 채워___.

제 6 절. 특성 X 선

X선의 발생

X선은 $10^3 \sim 10^6$ V의 전위차를 가진 전기마당에 의하여 가속된 빠르게 운동하는 전자가 금속을 타격할 때 발생한다.(그림 5-20)

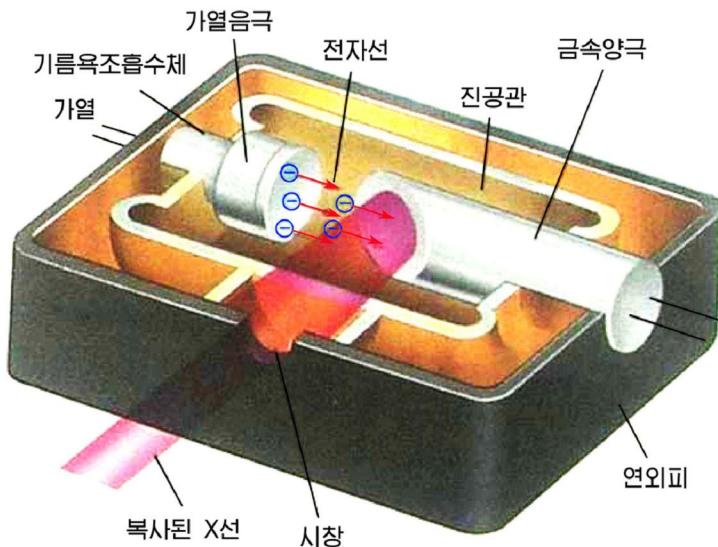



그림 5-20. X선발생장치

전자들은 열전자방출에 의하여 가열된 음극으로부터 떨어져나오며 전위차 U를 가진 전기마당에 의하여 금속으로 된 양극쪽으로 가속된다. 이때 전자가 운동하는 공간은 전자가 공기분자들과 충돌하지 않고 운동해나가도록 하기 위하여 높은 진공도를 보장한다.

전위차가 수천V정도로 높을 때 투과성이 대단히 높은 빛이 금속양극에서 발생하게 된다. 그림 5-21에서 X선발생의 원리도를 보여주었다.

그림 5-21. X선발생의 원리도

X선복사는 빛전기현상의 반대과정으로 된다.

X선복사에서는 입사하는 전자의 에네르기가 X선빛량자의 에네르기로 전환된다. 그러나 X선복사에서는 다른 에네르기들에 비하여 방출일이 작기때문에 방출일을 무시한다.

제동복사와 특성X선

매우 빠른 전자들이 금속양극속으로 들어갈 때 저항을 받으면서 속도가 느려지거나 멎게 된다. 이때 전자의 감속운동으로 하여 전자의 운동에네르기의 일부 또는 전체가 직접 복사에네르기로 전환될수 있다.

전자가 제동되면서 나타나는 이러한 복사를 **제동복사**라고 부른다.

금속안에서 전자들은 여러번 제동되기때문에 제동복사스펙트르는 련속스펙트르로 된다.(그림 5-22)

그림 5-22. 제동복사스펙트르분포

높은 에네르기를 가진 전자는 에네르기를 부분적으로 또는 완전히 금속안에 놓여있는 원자에 넘겨주어 원자의 내부전자층에 놓여있는 전자를 떼여낼수 있다. 이때 원자의 내부전자층에는 전자의 빈자리가 생긴다. 이 빈자리로 다른 전자층들로부터 전자가 이행하면서 복사되는 빛을 **특성X선(특성렌트겐선)**이라고 부른다.

특성X선은 제동복사로 인한 련속스펙트르선에 더 첨부된 예리한 봉우리들로 나타난다.(그림 5-23)

세기

K_α

K_β

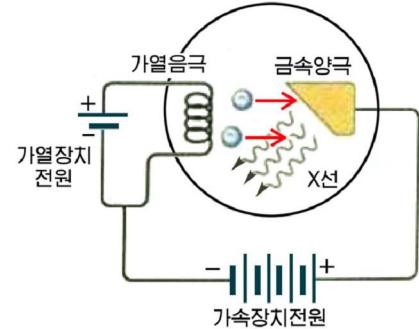
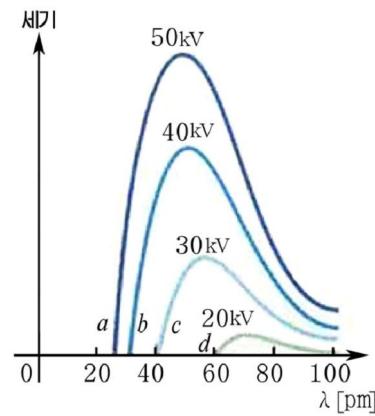
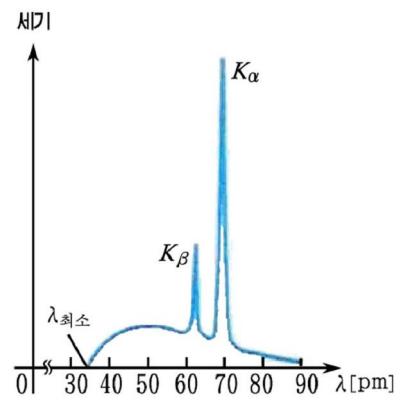
$\lambda_{최소}$

0 30 40 50 60 70 80 90 λ[pm]

그림 5-23. 특성 X선 봉우리들

제동복사스펙트르와 특성X선스펙트르는 X선스펙트르를 이룬다. 이때 X선스펙트르에는 최대주파수에 해당한 최소파장 $\lambda_{최소}$가 존재하는데

$$\lambda_{최소} = \frac{hc}{eU}$$

이다. 그리고 제동복사스펙트르는 양극을 이루는 금속의 종류에 거의 무관계하지만

특성X선스펙트르는 금속의 종류에 따라 완전히 차이나게 된다. 예리한 봉우리로 나타나는 특성X선스펙트르는 띠염띠염 떨어진 선스펙트르로 된다.

특성X선스펙트르계렬

특성X선스펙트르의 최소파장에 대응하는 진동수에 대해서는 **모즐리법칙**

$$\nu = 2.48 \times 10^{15} (Z-1)^2 \quad [\mathrm{Hz}]$$

가 성립한다는것이 실험적으로 밝혀졌다.(그림 5-24) 여기서 Z는 양극금속원자의 원자번호이다.

그림 5-24. 모즐리법칙

전자들이 금속양극을 타격하여 금속원자의 K전자층에 놓이는 전자들을 떼여냈을 때 K전자층에는 그우에 있는 $L, M, N, \cdots$ 전자층들에 놓여있는 전자가 이행할수 있는 빈 준위가 생긴다. 이 준위를 ***K*전자층X선에네르기준위**라고 부른다.

K전자층X선에네르기준위에로 L, M, N, $\cdots$ 전자층에 놓여있는 전자들이 이행할 때 두 에네르기준위의 차에 해당한 특성X선이 복사된다. 이때 전자가 L전자층으로부터 K전자층X선에네르기준위로 이행하면서 복사되는 X선을 **K_α 선**, M전자층으로부터 K전자층X선에네르기준위로 이행하면서 복사되는 X선을 **K_β 선**, N 전자층으로부터 K전자층X선에네르기준위로 이행하면서 복사되는 X선을 **K_γ 선**이라고 부른다.(그림 5-25)

그림 5-25. K_α 선과 L_α 선

이 선들은 특성X선 K계렬을 이룬다.

다른 경우들에도 이와 마찬가지로 각각 L, M, $\cdots$층X선에네르기준위라는 표현과 특성X선 $L, M, \cdots$을 사용한다.(그림 5-26)

실험적으로 얻어진 모즐리법칙은 전자들이 특성X선에네르기준위에로 이행하면서 특성X선을 복사한다는 사실에 의하여 잘 설명된다.

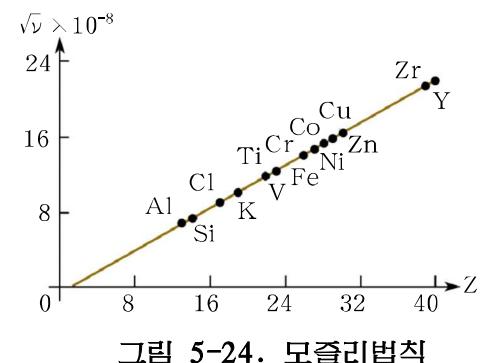
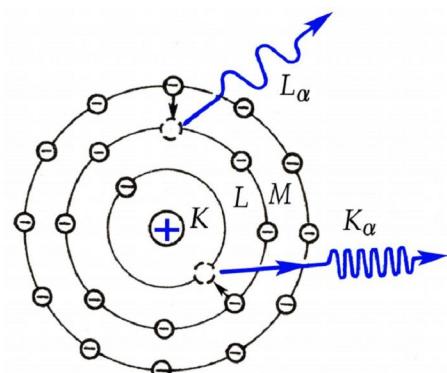
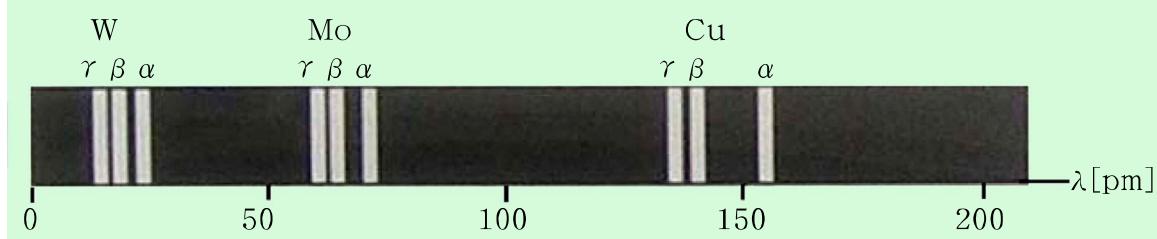



그림 5-26. 특성X선스펙트르의 K계렬

1. 특성X선은 양극물질의 종류에 따라 달라지는가?
2. 특성X선이 계렬을 이루는것은 무엇때문인가?
3. 특성X선 K 계렬을 구체적인 원소를 실례로 하여 설명하여라.

문제. 원자구조에 대한 견해가 력사적으로 어떻게 발전하여왔는가?

방향. 력사적으로 제기된 원자모형과 그러한 모형이 제기되게 된 실험적 및 리론적근거를 밝혀보아라.

복습문제

1. α 립자가 금원자와 충돌할 때 왜 전자의 영향은 고려하지 않는가?
2. 원자의 크기를 0.1nm라고 할 때 핵의 크기는 원자의 크기에 비해 얼마나 작은가를 비교하여 말하여라.
3. α 립자가 금원자의 중심으로부터 4×10^{-14} m 떨어진 거리까지 접근하기 위해서는 α 립자에 얼마만한 운동에네르기를 주어야 하는가?

   (**답.** 5.7MeV)
4. 수소원자에서 원자리길을 따라 운동하는 전자의 최소반경을 구하여라.

   (**답.** 0.05nm)
5. 수소원자에서 바닥준위에 놓여있는 전자의 에네르기를 구하여라.

   (**답.** -13.6eV)
6. 리드베르그상수를 식으로 적고 그 값을 계산하여보아라.
7. 주량자수가 n=2인 경우에 수소원자의 운동에네르기, 포텐샬에네르기, 전에네르기를 구하여라.

   (**답.** 3.4eV, −6.8eV, −3.4eV)
8. 수소원자에서 전자가 $n=2$ 인 에네르기준위로부터 $n=1$ 인 에네르기준위에로 이행할 때 복사되는 빛의 파장을 구하여라.

   (**답.** 122nm)
9. 수소원자에서 주량자수가 n=3인 경우에 몇개의 서로 다른 상태가 존재하는가?

   (**답.** 18개)
10. 수소원자에서 주량자수가 $n=4$인 경우에 각운동량의 최대크기는 얼마이며 Z 축과 이 각운동량벡토르가 이루는 각은 몇$^\circ$ 인가?

    (**답.** $2\sqrt{3}\hbar$, 30°)

11. 어떤 원자가 바닥준위와 그로부터 1eV, 3eV우에 놓이는 려기준위들을 가지고 있다. 이 원자에 의하여 복사될수 있는 빛의 진동수들과 파장들을 구하여라. 만일 전자가 처음에 바닥준위에 놓여있었다면 원자가 어떤 파장을 가지는 빛들을 흡수할수 있는가?

(답. $\nu_1 = 2.4\times10^{14}\mathrm{s}^{-1}$, $\lambda_1 = 12.4\times10^{-7}\mathrm{m}$, $\nu_2 = 4.8\times10^{14}\mathrm{s}^{-1}$, $\lambda_2 = 6.2\times10^{-7}\mathrm{m}$, $\nu_3 = 7.2\times10^{14}\mathrm{s}^{-1}$, $\lambda_3 = 4.13\times10^{-7}\mathrm{m}$ λ_1, λ_3을 가진 빛들을 흡수할수 있다.)

12. 전자가 하나 떨어져나간 헬리움원자는 핵의 전기량이 수소원자핵의 전기량의 두배라는 차이를 제외하면 수소원자처럼 취급할수 있다. n=1, 2인 경우에 이러한 헬리움이온의 에네르기준위는 대응하는 수소원자의 에네르기준위와 크기에서 얼마나 차이나는가?

(답. 40.8eV, 10.2eV)

13. 수소원자에서 바닥준위에 있던 전자가 빛량자를 흡수하고 $n=4$인 려기준위로 려기되였다. 빛량자의 에네르기는 얼마인가?

(답. 12.75eV)

14. 10kV의 전위차를 가진 전기마당속에서 전자가 가속될 때 발생하는 X선의 최소파장을 구하여라.

(답. 124pm)

15. 실험적으로 측정된 K_α선의 파장이 153pm이다. 이런 X선을 복사하는 금속은 어떤 금속인가?

(답. 동)

제6장. 원자핵과 소립자

20세기 물리학분야에서 거둔 가장 큰 성과의 하나는 원자핵과 소립자에 대한 연구가 본격적으로 진행되여 그 연구결과들이 경제발전에 크게 기여한것이다.

원자핵의 구조와 성질이 밝혀지고 방사성동위원소와 방사선이 인민경제 여러 부문에 광범히 리용되고있으며 원자핵속에 숨어있는 방대한 에네르기를 찾아내여 인민경제의 급속한 발전에 필요한 미래의 동력문제를 해결할 전망이 열리게 되였다.

원자핵과 소립자에 대한 지식은 또한 우주개발사업을 비롯한 첨단과학기술분야들에 필요한 기초지식으로 된다.

이 장에서는 원자핵의 구조와 핵의 결합에네르기, 방사선과 그 리용, 원자력의 리용과 소립자세계에 대한 기초지식을 배우게 된다.

제 1 절. 원자핵의 구조

우리가 잘 아는것처럼 모든 물질들은 원자로 이루어져있으며 원자는 핵과 전자들로 이루어져있다.

그러면 원자핵은 더 나눌수 없겠는가.(그림 6-1)

이것을 알아보려면 원자핵을 《깨뜨려》보아야 한다.

그림 6-1. 핵은 무엇으로 이루어졌는가

핵은 무엇으로 이루어졌는가

양성자. 1919년 물리학자 라자포드는 핵의 구조를 알아보기 위하여 헬리움원자핵($^4_2$He)으로 질소원자핵을 타격하는 실험을 진행하였다.

이때 질소원자핵으로부터 가장 가벼운 수소원자핵이 나왔다.(그림 6-2)

이처럼 핵안에는 수소원자핵이 들어있는데 이 수소원자핵($^1_1$H)을 **양성자(프로톤)**라고 부른다.

그림 6-2. 양성자발견실험

양성자는 질량이 $m_p = 1.672\ 623 \times 10^{-27}$ kg으로서 전자질량의 1 836배이며 전자의 전기량과 크기가 같고 부호가 +인 립자이다.

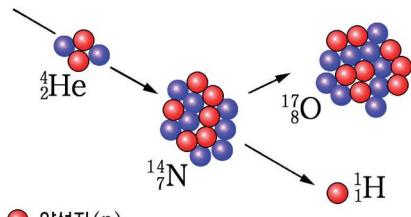
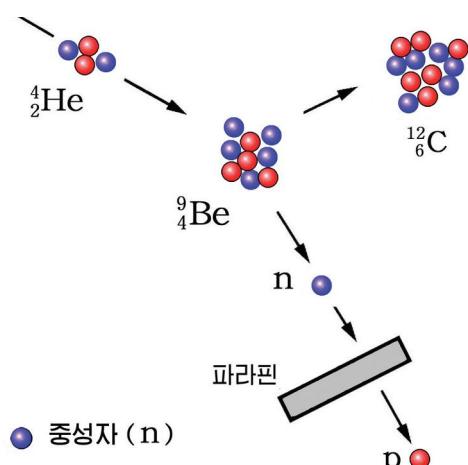
이로부터 원자번호가 Z인 원자는 Z개의 양성자와 Z개의 전자로 이루어졌다고 보아야 할것이다.

중성자. 원자핵들의 질량을 측정해보면 그것이 Z개의 양성자들의 질량의 합보다 거의 2배이상이나 크다. 실례로 $Z=8$인 산소원자와 $Z=11$인 나트리움원자의 질량은 각각 양성자질량의 16배, 23배에 가깝다.

그림 6-3. 중성자발견실험

이것은 원자핵속에는 양성자외에도 다른 립자들이 더 들어있다는것을 의미한다.

1932년에 챠드위크는 헬리움원자핵으로 베릴리움원자핵을 타격하는 실험을 진행하였다.(그림 6-3)

이 실험에서 헬리움원자핵을 흡수한 베릴리움원자핵으로부터 나오는 투과력이

센 립자는 전기를 띠지 않아 관측하기 어려우므로 파라핀(수소원자를 많이 포함한 것)을 통과시켜 이때 생겨나는 양성자를 관측하였다.

여기로부터 헬리움원자핵으로 베릴리움원자핵을 타격하면 양성자보다는 질량이 약간 더 크고 전기를 띠지 않은 립자가 나온다는것을 알아내였다.

이처럼 양성자보다 질량이 약간 더 크고 전기를 띠지 않는 립자를 **중성자(뉴트론)**라고 부른다.

중성자의 질량은 $m_n = 1.674\,928 \times 10^{-27}$ kg이다.

핵의 구조. 우의 두 실험으로부터 원자핵은 양성자와 중성자로 이루어졌다는것을 알수 있다.(그림 6-4의 ㄱ)

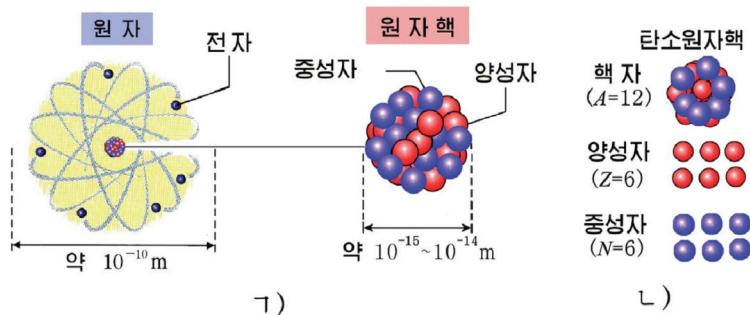



그림 6-4. 원자핵의 구조

실례로 탄소원자핵은 6개의 양성자와 6개의 중성자로 이루어져있다.(그림 6-4의 ㄴ)

원자핵을 이루고있는 양성자와 중성자를 통털어 **핵자**라고 부른다.

그러므로 핵을 이루고있는 양성자의 수(**전하수**) Z와 중성자의 수 N을 합한 핵자수 A를 **질량수**라고 부른다.

즉

$$A = Z + N \quad \text{질량수}$$

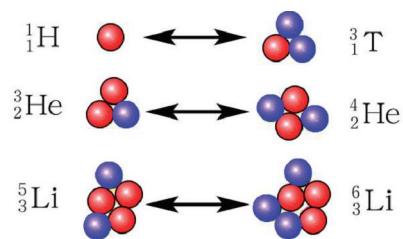
원자핵은 원소기호와 함께 원소기호의 왼쪽 우에는 질량수 A를, 왼쪽 밑에는 전하수 Z를 붙여서 표시한다.

즉 $^{A}_{Z}\mathrm{X}$ **원자핵의 표시법** 례: $^{23}_{11}\mathrm{Na}$ 나트리움원자핵

동위핵과 동중핵

멘델레예브원소주기표를 보면 중성자수는 달라도 양성자수가 같은 원자들은 같은 수의 전자를 가지므로 같은 자리에 놓이며 그것들의 화학적성질도 같다.

그림 6-5. 동위핵

이처럼 양성자수가 같고 중성자수가 다른 원자들을 **동위원소**라고 부르며 동위원소의 원자핵들을 **동위핵**이라고 부른다.(그림 6-5)

동위핵들은 양성자수 Z는 같지만 중성자수 N이 다르므로 질량수 A가 다르다.

실례로 수소동위원소중에는 수소 $^{1}_{1}\mathrm{H}$와 중수소 $^{2}_{1}\mathrm{D}$, 초중수소 $^{3}_{1}\mathrm{T}$가 있는데 이 원자핵들은 동위핵들이다.

동위원소들은 질량차이를 리용하여 물리적방법으로만 분석할수 있다.

그림 6-6. 동중핵

원자핵들중에는 전하수는 다르지만 질량수가 같은 원자들도 있다.

질량수는 같지만 원자번호가 다른 원소들을 **동중원소**라고 부르며 동중원소의 원자핵들을 **동중핵**이라고 부른다.(그림 6-6)

실례로 헬리움 $^{3}_{2}\mathrm{He}$과 초중수소 $^{3}_{1}\mathrm{T}$은 동중원소이며 이 원자핵들은 동중핵들이다.

원자질량단위

원자나 원자핵과 같은 립자들의 질량은 매우 작으므로 kg단위를 쓰기 불편하다. 그러므로 원자핵의 질량을 표시하기 위하여 탄소 $^{12}_{6}\mathrm{C}$ 원자 한개의 질량의 1/12을 질량의 단위 1D로 정하고 이것을 **원자질량단위**라고 부른다.

원자질량단위 1D를 kg단위로 표시하면 다음과 같다.

$$1\mathrm{D}=\frac{^{12}_{6}\mathrm{C}\ 원자질량}{12}=1.660\,53\times10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

자료 원자핵의 체적과 밀도

α 립자산란실험을 비롯하여 여러 연구결과에 의하면 핵의 반경은 질량수의 1/3제곱에 비례한다는것을 알수 있다. 즉 $R=r_0A^{1/3}$ (여기서 $r_0=(1.2\sim1.37)\times10^{-15}$ m)

따라서 원자핵의 체적은 질량수 A에 비례한다. 이것은 핵의 체적을 질량수로 나눈 값 즉 양성자나 중성자 한개의 체적은 거의 같다는것을 의미한다. 일반적으로 핵의 질량은 $M=A\times1\mathrm{D}=A\times1.66\times10^{-27}$ kg으로 계산하며 핵의 밀도는 다음과 같다.

$$\rho=\frac{M}{V}=\frac{A\times1.66\times10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi R^3}\approx2.3\times10^{17}(\mathrm{kg/m^3})$$

즉 모든 핵에서 밀도는 거의 같으며 그 값은 매우 크다.

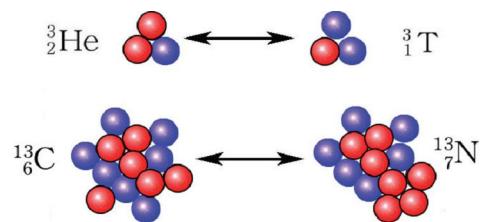
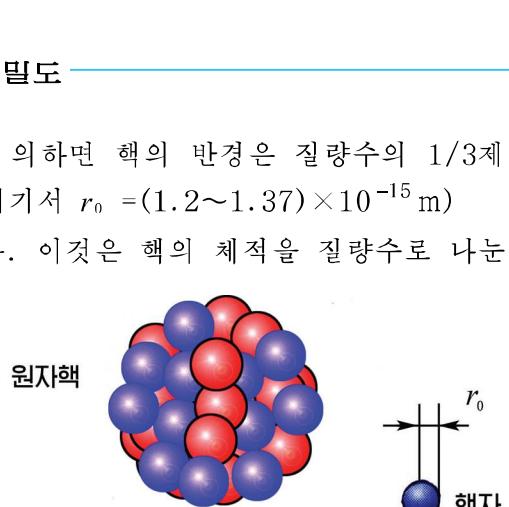
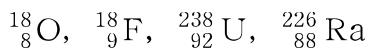



그림 6-7. 원자핵의 모양

몇가지 립자나 원자한개의 질량을 원자질량단위로 나타내면 다음표와 같다.

핵자, 원자	질량[D]	원자	질량[D]	원자	질량[D]
양성자 p	1.007 28	중수소 $^{2}_{1}H$	2.014 10	리티움 $^{7}_{3}Li$	7.016 00
중성자 n	1.008 67	3중수소 $^{3}_{1}H$	3.016 05	질소 $^{14}_{7}N$	14.003 1
수소 $^{1}_{1}H$	1.007 83	헬리움 $^{4}_{2}He$	4.002 60	우라니움 $^{235}_{92}U$	235.044

표에서 보는것처럼 원자질량단위로 표시한 수값과 근사한 옹근수가 바로 질량수 A이다. 멘델레예브원소주기표에 표시되여있는 원자량은 자연계에 있는 그 원소의 동위원소들의 평균질량을 원자질량단위로 계산한 수이다.

실례로 탄소는 $^{12}_{6}C$ 가 98.9%, $^{13}_{6}C$ 가 1.1% 들어있으므로 탄소의 원자량은 $12D\times0.989+13.003\ 4D\times0.011=12.01D$이다.

문 제

1. 다음 문장에서 틀린 부분을 고쳐라.
   ㄱ) 원자핵은 양성자와 전자, 중성자로 이루어져있다.
   ㄴ) 동중원소는 질량수가 같고 중성자수가 같으므로 멘델레예브원소주기표에서 같은 자리를 차지한다.
   ㄷ) 동위원소는 질량수가 달라도 양성자수가 같으므로 멘델레예브원소주기표에서 같은 자리를 차지한다.
   ㄹ) 질소의 원자량이 14이므로 질소원자핵의 핵자수는 14이고 질소원자 한개의 질량은 14g이다.
2. 원자질량단위의 크기가 $1D=1.660\ 53\times10^{-27}$ kg임을 밝혀라.
3. 질소원자핵이 헬리움원자핵을 포획하였다. 이 원자핵을 표시하여라. 또한 양성자를 내보낸 후의 원자핵을 표시하여라.
4. 다음 핵들은 몇개의 양성자와 몇개의 중성자로 이루어져있는가?

   $^{18}_{8}O$, $^{18}_{9}F$, $^{238}_{92}U$, $^{226}_{88}Ra$

제 2 절. 핵력과 결합에네르기

원자를 수만K까지 가열하면 빛을 내거나 이온화될수 있지만 원자핵은 변하지 않는다.

이것은 원자핵이 매우 세게 결합되여 대단히 견고하다는것을 보여준다.

그러면 핵자들사이에 어떤 힘이 작용하며 핵자들을 떼내기 위해서는 얼마의 에네르기가 필요하겠는가.

핵력과 그 특성

핵안에 있는 핵자들사이에는 센 전기적밀힘이나 만유인력(끌힘)이 작용한다.

전기적밀힘은 양성자와 양성자들사이에서만 작용하는 센 밀힘으로서 핵자들을 결합시키는 힘은 아니다. 또한 두 핵자들사이에 작용하는 만유인력은 전혀 보잘것없는 대단히 작은 끌힘이다. 이로부터 핵안에서 핵자들사이에는 만유인력이나 전기적 밀힘외에 매우 센 힘이 작용한다고 보아야 한다.

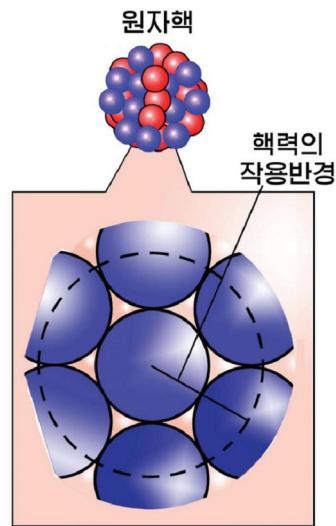
핵안에서 핵자들사이에만 작용하는 매우 센 힘을 **핵력**이라고 부른다.

핵력은 다른 힘들과 어떻게 다른가.

핵력은 우선 매우 센 힘이다. 핵안에서 핵자들사이에 작용하는 핵력은 양성자들사이에 작용하는 전기적밀힘보다 약 100배정도, 핵자들사이에 작용하는 만유인력보다 10^{38}배정도로서 대단히 센 힘이다.

그림 6-8. 핵력의 작용반경

핵력은 또한 전기량에는 관계없이 작용하는 힘이다. 핵안에서 전기힘은 양성자와 양성자사이에만 작용한다. 그러나 핵력은 양성자와 양성자사이, 양성자와 중성자사이, 중성자와 중성자사이에도 같은 크기로 작용한다.

다음으로 핵력은 매우 가까운 거리에서만 세게 작용하며 거리가 멀어지면 급격히 작아지는 힘이다. 핵들이 가까와져서 2×10^{-15}m(핵자의 크기)정도로 되면 센 핵력이 생기며 거리가 조금만 멀어져도 핵력은 매우 빨리 작아진다. 그러므로 한개 핵자는 핵력의 작용구(핵력이 미치는 공간범위)안에 있는 핵자와만 힘을 주고받는데 (포화성) 그속에 들어오는 핵자수가 제한되므로 자기 둘레의 몇개의 핵자들과만 호상작용을 한다.(그림 6-8)

핵의 결합에네르기와 질량결손

핵자들이 세게 결합되여있는 정도를 어떻게 평가하겠는가.

세게 결합된 핵자들을 떼여내자면 밖으로부터 에네르기를 주어야 한다.

실례로 중수소핵 ${}^{2}_{1}$D에 2MeV의 에네르기를 주면 양성자와 중성자로 갈라진다.

더 많은 핵자들로 이루어진 핵에서 핵자들을 따로따로 갈라놓자면 더 많은 에네르기를 주어야 한다. 원자핵을 이루고있는 핵자들을 모두 따로따로 떼여놓는데 필요한 에네르기를 **핵의 결합에네르기**라고 부른다.

핵을 개개의 핵자들로 갈라놓으려면 결합에네르기만 한 에네르기를 핵에 주어야 한다.

이것은 물분자들이 모여 물방울을 이룰 때 에네르기를 내보내고 반대로 물방울을 개개의 물분자로 갈라내려면 그만한 에네르기를 주어야 하는것과 비슷하다.

핵의 결합에네르기는 액체의 증발열과 비슷하다.

핵의 결합에네르기는 어떻게 구할수 있는가.

원자핵의 질량은 언제나 그것을 이루는 핵자들의 질량을 합한것보다 작다.

즉 핵을 이룰 때 계의 질량은 감소한다.

원자핵을 이루는 개별적핵자들의 질량의 총합에서 원자핵의 질량을 던 차를 **질량결손**이라고 부른다. 따라서 Z개의 양성자와 N개의 중성자로 이루어진 핵에서 질량결손은 다음과 같다.

$$\Delta m = Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} - M \qquad \text{질량결손}$$

그러므로 상대성리론에서 에네르기의 변화와 질량변화사이의 관계식 $\Delta E = \Delta mc^2$ 에 의하면 핵의 결합에네르기는 다음과 같다.

$$\Delta E = \Delta mc^2 = (Zm_{\mathrm{p}} + Nm_{\mathrm{n}} - M)c^2 \qquad \text{결합에네르기}$$

※ 일반적으로 계산할 때에는 $Zm_{\mathrm{p}} \approx Z(m_{\mathrm{p}} + m_e)$ 으로, M은 해당한 동위원소의 원자핵의 질량으로 한다.

핵에 외부로부터 결합에네르기만 한 에네르기를 주어 핵자들을 따로따로 떼놓으면 에네르기는 늘고 질량도 늘어난다.(그림 6-9의 ㄱ)

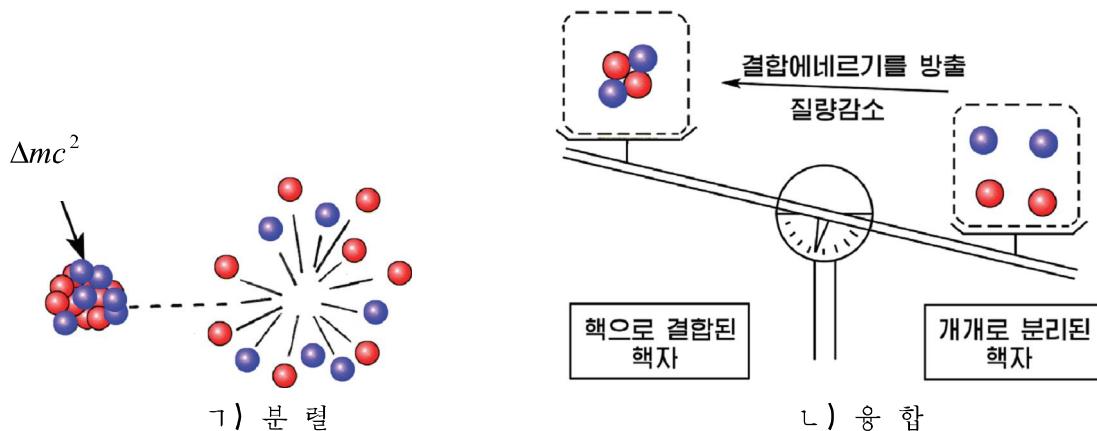



그림 6-9. 원자핵의 결합에네르기

또한 개별적핵자들이 결합되여 원자핵을 이룰 때에는 결합에네르기만 한 에네르기를 밖으로 내보내므로 에네르기가 줄고 따라서 질량도 줄어든다.(그림 6-9의 ㄴ)

비결합에네르기

핵의 결합에네르기는 핵자수에 비례하므로 핵자수가 다른 핵들가운데서 어느 핵이 더 견고한가를 평가하기는 힘들다.

주어진 핵안에서 핵자들이 얼마나 세게 결합되여있는가를 평가하자면 한개 핵자에 해당되는 결합에네르기값을 따져보아야 한다.

핵안에서 핵자 한개를 떼내는데 드는 에네르기를 **핵의 비결합에네르기**라고 부른다. 핵의 비결합에네르기는 핵의 결합에네르기를 핵의 질량수로 나누어 계산한다.

$$f = \frac{\Delta E}{A} \quad \text{비결합에네르기}$$

※ 일반적으로 핵을 구성하는 매개 핵자들을 떼내는데 드는 에네르기는 차이나며 핵의 비결합에네르기는 그 값들을 평균한것이다.

비결합에네르기가 큰 핵일수록 더 공고하고 안정한 핵이다.

질량수에 따르는 비결합에네르기변화를 그라프로 표시하면 그림 6-10과 같다.

그라프에서 알수 있는바와 같이 비결합에네르기는 A가 60정도인 핵에서 8.6MeV정도로서 가장 크다.

이것은 질량수가 60정도인 핵이 가장 안정하다는것을 의미한다.

또한 그라프에서 질량수가 작은 핵들가운데도 비결합에네르기가 특별히 큰 핵들이 일부 있으며 이 핵들도 역시 안정하다.

그러나 질량수가 120이상으로 큰 핵들과 질량수가 20이하인 가벼운 핵들은 대체로 비결합에네르기값이 작으며 이것은 그 핵들이 불안정하다는것을 의미한다.

그림 6-10. 질량수에 따르는 핵의 비결합에네르기

질량수가 큰 무거운 핵들은 불안정하므로 분렬되면 더 안정한 핵으로 되며 질량수가 작은 가벼운 핵들도 불안정하여 융합될 때 더 안정한 핵으로 된다.

[례제] 헬리움원자핵은 2개의 양성자와 2개의 중성자로 이루어져있으며 그의 질량은 4.0026D이다. 헬리움원자핵의 결합에네르기와 비결합에네르기는 얼마인가?

풀이. 주어진것: $M = 4.0026\text{D}$

$Z = 2$

$N = 2$

$m_p = 1.00728\text{D}$

$m_n = 1.00867\text{D}$

구하는것: ΔE?, f?

결합에네르기는

$$\Delta E=\Delta mc^2=[(Zm_p+Nm_n)-M]c^2=$$
$$=[(2\times1.00728+2\times1.00867)-4.0026]\times1.66053\times10^{-27}\times$$
$$\times(3\times10^8)^2=4.87\times10^{-29}\times(3\times10^8)^2\approx44\times10^{-13}(J)=27.5(MeV)$$

비결합에네르기는 $f=\frac{\triangle E}{A}=\frac{27.5}{4}$ MeV=6.88MeV

답. 27.5MeV, 6.88MeV

문 제

1. 핵력이 있다는것을 어떻게 알수 있는가? 두 양성자들사이에 작용하는 핵력, 만유인력, 전기힘을 비교하여라.
2. 질량 1D에 해당한 에네르기는 몇eV인가?
3. 산소원자핵 $^{16}_{8}O$ 의 질량은 $M=15.9949$D이다. 산소원자핵의 비결합에네르기는 얼마인가?
4. 1J에 대응하는 질량을 계산하여라.

제3절. 핵 모 형

원자핵은 너무 작기때문에 눈으로 직접 볼수 없다. 그러므로 여러가지 실험자료에 기초하여 핵의 구조를 가상적으로 생각하여야 한다.

이렇게 가상적으로 생각한 핵구조를 **핵모형**이라고 부른다.

력사적으로 원자핵에 대한 여러가지 모형들이 제기되였으나 아직까지 완전히 알아내지 못하였다. 이 모형들가운데서 몇가지를 보기로 하자.

핵의 액체방울모형

액체는 액체분자들사이의 호상작용에 의하여 구모양의 액체방울을 이루고있다.

이때 액체방울속의 개개의 액체분자들은 해당한 작용구안의 분자들과만 호상작용하며 액체방울을 개개의 물분자로 갈라내려면 증발열만 한 에네르기를 주어야 한다.

그림 6-11. 핵의 액체방울모형

이와 비슷하게 핵속에서도 핵자들이 핵력을 받으면서 구모양의 핵을 이룬다고 보는 모형이 **액체방울모형**이다.(그림 6-11)

이 모형은 우선 핵의 결합에네르기의 특성을 잘 설명하여준다. 즉 모든 핵들의 비결합에네르기가 약 8MeV정도로 일정하게 되는 근거와 가벼운 핵과 무거운 핵에서 비결합에네르기가 작아지는 근거를 잘 설명할수 있다.

액체분자들사이의 호상작용이 작용구안에 있는 액체분자들사이에만 있는것처럼 핵안에서도 이웃에 있는 핵자(작용구안의 핵자)들사이에만 핵력을 주고받으므로 한개의 핵자를 떼여내자면 이웃한 핵자들과의 호상작용을 극복할수 있는 에네르기를 주어야 한다.(그림 6-12)

그림 6-12. 액체분자들의 호상작용과 핵자들의 호상작용

따라서 핵의 비결합에네르기는 핵자가 많든 적든 관계없이 일정한것이다. 또한 핵의 겉면에 있는 핵자들은 액체겉면의 물분자와 같이 바깥쪽으로는 서로 힘을 주고받는 다른 핵자들이 없으므로 핵속으로만 핵력을 받는다. 그러므로 핵의 겉면에 있는 핵자를 떼여낼 때에는 모든 방향으로 다 핵력을 받는 핵속의 핵자를 떼여낼 때보다 에네르기가 적게 든다. 따라서 가벼운 핵에서는 대부분의 핵자들이 핵겉면을 이루므로 비결합에네르기가 작다.(그림 6-13의 ㄱ)

그림 6-13. 가벼운 핵과 무거운 핵에서 비결합에네르기

무거운 핵에서는 속에 있는 핵자수는 많지만 양성자의 수도 많아서 전기적밀힘이 세므로 핵자들을 떼여내기가 쉬우며 비결합에네르기가 작다.(그림 6-13의 ㄴ)

다음으로 액체방울모형은 핵분렬과정도 잘 설명한다.(그림 6-14)

중성자를 흡수하기 전에 핵은 액체방울처럼 구모양을 이룬다. 중성자를 흡수하여 핵이 이지러지면 겉면적이 커지고 따라서 겉면에네르기도 커진다. 한편 양성자들사이의 거리도 멀어지므로 전기적밀힘은 약해진다. 처음에는 겉면에네르기의 증가가 전기적호상작용에네르기의 감소보다 커서 겉면이 더 커지며 나중에는 두 부분으로 갈라지고 다시 핵에서의 겉면장력과 양성자들사이의 전기적밀힘이 비겨 구모양을 이루게 된다.

그림 6-14. 액체방울모형에 의한 핵분렬과정

그러나 액체방울모형은 핵들가운데 안정한 핵과 불안정한 핵들이 있다는 실험적사실들에 대하여서는 설명하지 못하는 결함이 있다. 이러한 사실은 핵의 층모형으로 설명할수 있다.

핵의 층모형

화학원소들가운데는 전자가 다찬 전자층을 가지고있어 화학적으로 대단히 안정한 원소들이 있는것처럼 핵들가운데도 비결합에네르기가 특별히 커서 안정한 원자핵들이 있다.

원자속의 전자들이 층을 이루면서 분포되듯이 핵속의 핵자들도 층을 이루는 구조를 가진다고 보는 모형이 **핵의 층모형**이다. 핵의 층모형에서는 양성자와 중성자들이 각각 층구조를 가지며 매 층에 해당한 에네르기준위는 1*s*, 2*p*, 3*d*, 2*s*, 4*f*, …의 순서로 된다.(그림 6-15)

그림 6-15. 핵의 층모형

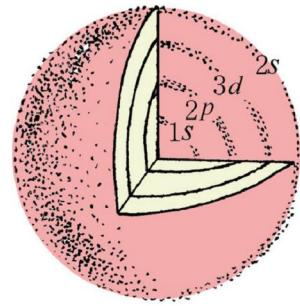
핵의 층모형은 핵들가운데 안정한 핵과 불안정한 핵들이 있다는것을 잘 설명해준다. 핵의 비결합에네르기곡선을 보면 비결합에네르기가 특별히 큰 원자핵들이 있다는것을 알수 있다. 이러한 핵들은 특별히 안정한 핵들이다.

원자의 전자층이 전자로 다 채워진 원자(드문가스원자)들이 화학적으로 안정한 원자로 되는것처럼 원자핵에서도 양성자나 중성자들이 각각 어떤 층을 완전히 채우면 안정한 핵으로 된다. 안정한 핵을 **마수핵**이라고 부른다.

양성자나 중성자의 수가 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126인 핵이 마수핵이며 이 수들을 **마수**라고 부른다.

핵에서 양성자수와 중성자수가 각각 마수로 되면 이런 핵을 **2중마수핵**이라고 부른다.

2중마수핵은 ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$, ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$, ${}^{40}_{20}\mathrm{Ca}$, ${}^{48}_{20}\mathrm{Ca}$, ${}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$로서 모두 5개가 있는데 이 핵들은 특별히 안정하다.

이와 같이 층모형은 안정한 핵과 불안정한 핵이 있게 되는 근거를 잘 설명해주지만 핵력의 특성(핵의 결합에네르기특성)과 핵분렬과정을 원만히 설명하지 못한다.

핵의 일반화모형

액체방울모형과 층모형을 결합시켜 핵의 성질들을 보다 잘 설명하는 모형이 **핵의 일반화모형**이다.

이 모형은 1955년에 리론적으로 체계화되였다.

이 모형에서는 핵안에서 핵자들이 다찬 층까지는 액체방울모형으로 보고 나머지 핵자들은 액체방울바깥에 층을 이루면서 분포되여 층모형을 이룬다고 볼수 있다.(그림 6-16)

핵의 일반화모형은 안정한 핵과 불안정한 핵의 존재를 설명하지 못하는 액체방울모형과 핵의 결합에네르기특성과 핵분렬과정을 설명하지 못하는 층모형의 부족점들을 극복하였다.

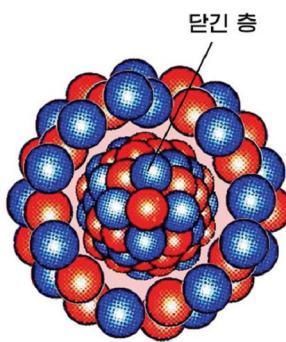



그림 6-16. 핵의 일반화모형

그러나 일반화모형도 완전무결한 모형은 아니다.

핵의 구조는 아직까지 완전히 해명되지 못하였다.

문 제

1. 핵의 액체방울모형을 생각하게 된 근거를 설명하여라.
2. 핵의 층모형을 생각하게 된 근거를 설명하여라.
3. 가벼운 핵과 무거운 핵에서 비결합에네르기가 작아지는 근거를 설명하여라.
4. 핵의 비결합에네르기가 약 8MeV정도로 일정하게 되는 근거를 설명하여라.

제4절. 방 사 선

방사선의 발견은 렌트겐선의 발견과 함께 현대물리학에서 가장 중요한 발견들중의 하나이다.

방사선의 발견으로 원자핵의 구조가 밝혀지게 되였으며 물질세계의 본질을 해명하는데서 커다란 전진이 이룩되였다.

방 사 선

1896년 어느날 베크렐은 이상한 현상을 발견하였다.

우라니움이 들어있는 광석과 함께 암실책상안에 넣어두었던 검은 종이에 싼 사진건판을 현상해보았는데 놀랍게도 우라니움덩어리의 모양이 뚜렷이 찍혀있었던것이다.

진지한 연구끝에 베크렐은 우라니움광석자체에서 눈에 보이지 않는 강한 빛이 복사된다는것을 알아내였다.

이 빛은 우라니움원자핵이 내보낸것이다.

그후 물리학자 큐리는 이에 대하여 더 깊이 연구하는 과정에 이 복사선의 본질을 밝혀냈으며 이러한 복사선을 내는 새로운 원소인 폴로니움과 라디움을 발견하였다.

원자핵이 외부작용이 없이 스스로 내보내는 눈에 보이지 않는 복사선을 **방사선**이라고 부른다.

방사선을 내는 성질을 **방사성**, 방사성을 가진 물질을 **방사성물질**, 방사성을 가진 원소를 **방사성원소**라고 부른다.

천연방사성물질에서 나오는 방사선이 어떤 선인가를 알아보기 위하여 방사선이 지나가는 방향에 수직으로 자기마당이나 혹은 전기마당을 작용시키고 자리길의 구부러지는 정도를 따져보면 방사선이 세 방향으로 갈라지는것을 알수 있다.(그림 6-17)

α**선.** 자기마당의 작용으로 약하게 기울어지는 방사선을 α**선**이라고 부른다.

α선이 자기마당속에서 구부러지는 정도와 방향을 따져보면 그것이 +전기를 띤 무거운 립자들의 흐름이며 그것의 전하수는 2, 질량수는 4라는것을 알수 있다. 즉 α선은 10^4km/s의 속도로 운동하는 헬리움원자핵($^4_2$He)들의 흐름이다.

그림 6-17. 방사선의 세 성분

β선. 자기마당속에서 α선과 반대쪽으로 세게 기울어지는 방사선을 **β선**이라고 부른다.

β선이 자기마당속에서 α선과 반대방향으로 세게 구부러지는 정도를 재여보면 그것이 −전기를 띤 가벼운 립자들의 흐름이며 그의 전하수가 −1이라는것을 알수 있다.

즉 β선은 0.99c의 속도를 가진 전자($-e$)들의 흐름이다.

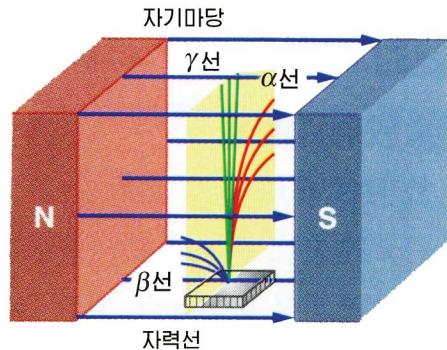
※ 인공방사성동위원소들중에는 질량이나 전기량의 크기는 전자와 같으나 전기량의 부호가 +인 양전자를 방출하는것도 있다.

γ선. 자기마당속에서 기울어지지 않고 곧추 나가는 방사선을 **γ선**이라고 부른다.

γ선은 자기마당의 작용을 받지 않는것으로 보아 전기를 띠지 않은 립자들의 흐름이라는것을 알수 있다.

결정에 의한 γ선의 에돌이실험결과에 그 본질이 밝혀졌다.

γ선은 렌트겐선보다 진동수가 더 큰 전자기파 즉 빛량자들의 흐름이다.

이 빛량자의 에네르기는 0.05~10MeV이다.

일화 — 마리 큐리

마리 큐리(1867-1934)는 세계의 첫 녀성과학자이며 2중노벨수상자이다.

프랑스 빠리대학을 최우등으로 졸업한 그는 베크렐선의 정체를 밝히는 박사론문을 쓰기로 결심하였다. 당시 학자들은 력청우라니움광석에 있는 우라니움에서만 강한 방사선이 나온다고 보았으므로 우라니움을 뺀 《찌꺼기》에서는 방사선이 나오지 않는다고 생각하였다. 큐리부인은 고심어린 작업끝에 우라니움을 모조리 뽑아버리였다.

그날 저녁 실험설비들을 정돈하던 큐리부인은 전기를 띠고있지 않던 검전기의 알루미니움띠가 움직이는것을 보고 깜짝 놀랐다. 방사선을 세게 내는 어떤 물질이 검전기주위에 있는것이 틀림없었다. 그후 큐리부인은 비스무트화합물속에서 방사능이 우라니움보다 400배나 큰 새로운 원소를 발견하고 《폴로니움》이라고 불렀다.

진지한 연구끝에 또 다른 화합물인 바리움화합물에서 방사능이 우라니움보다 더 센 원소를 또 하나 발견하고 거기에 《라디움》이라는 이름을 붙였다.

큐리부부는 2개의 방사성원소를 발견하여 1903년 노벨물리학상을 받았다.

큐리부인은 1911년에 다시 노벨화학상을 받았다.

방사선의 성질

방사선은 물질속의 원자와 충돌하여 그것을 이온화시키거나 빛을 내게 하고 분자와 충돌하여 그것을 원자로 갈라놓기도 하며 생물체의 세포를 파괴하기도 한다.

방사선의 이러한 작용은 α선, β선, γ선에서 그 정도가 서로 다르다.(그림 6-18)

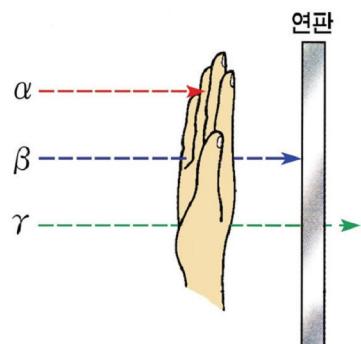
그림 6-18. 방사선의 작용

α선은 물질을 이루는 원자나 분자와 세게 작용하며 물질층을 잘 뚫고나가지 못한다. 그러므로 손바닥이나 0.3mm정도의 연판으로도 막을수 있다.

β선은 α립자보다는 약하나 γ선보다는 물질과 세게 작용하며 수mm정도의 연판으로 막을수 있다.

γ선은 물질속의 원자와 약하게 작용하며 물질층을 잘 뚫고나가므로 수cm정도의 연판으로도 막을수 없다.

이처럼 물질에 대한 방사선의 작용은 질량과 전기량에 관계되며 α선이 제일 세고 γ선이 제일 약하다.

이온화능력이 세면 그만큼 에네르기가 소모되므로 투과능력이 약하다.

방사선의 원인

방사선이 어떻게 나오는가를 따져보자.

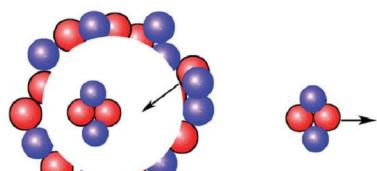
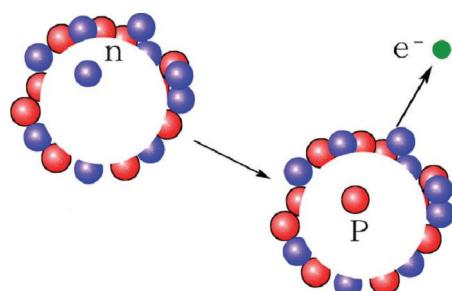
α선의 원인. 물질을 이루는 원자는 핵과 전자로 이루어져있으므로 α선($^{4}_{2}He$의 흐름)은 원자핵으로부터만 나올수 있다. 방사성핵속의 핵자들중에서 각각 두개의 양성자들과 중성자들이 결합되여 2중마수핵인 α립자가 생긴다. 이 α립자가 핵밖으로 나오는것이 α선이다.(그림 6-19)

그림 6-19. α선의 원인

β선의 원인. 방사성물질을 극저온상태나 수천K의 높은 온도상태에 넣어도 β선이 변함없이 복사되는것은 역시 핵으로부터만 나올수 있다는것을 보여준다.

핵속에는 전자가 없다. 그러나 핵속의 중성자가 양성자와 전자로 전환될 때 전기량보존법칙으로부터 전자가 생기며 이때 양성자는 핵속에 남고 전자만이 밖으로 나오는데 이것이 β립자이다.(그림 6-20)

그림 6-20. β선의 원인

γ선의 원인. γ선의 에네르기는 원자안의 전자가 가지는 에네르기보다 비할바없이 크므로 역시 원자핵에서만 나올수 있다.

방사성원자핵은 α립자나 β립자를 내보낸 후 불안정한 상태에 있게 되며 보다 안정한 상태에로 이행하면서 그 에네르기차만 한 에네르기를 가진 γ량자를 내보내는것이다.(그림 6-21)

따라서 γ량자를 내보낸 원자핵은 다른 핵으로 넘어가지 않고 그 핵의 에네르기만이 줄어든다.

원자에서의 전자층과는 달리 핵에서는 에네르기준위사이의 간격이 MeV정도로 크므로 복사되는 γ선의 파장이 보임빛이나 X선보다도 매우 짧은것이다.

그림 6-21. γ선의 원인

[례제] 방사선이 지나가는 방향에 수직으로 작용시킨 전기마당속에서 방사선의 자리길이 어떻게 구부러지겠는가를 설명하여라.

풀이. α선은 +전기를 띠였으므로 전기마당속에서 전기힘을 받아 전기마당과 같은 방향으로 기울어진다.(그림 6-22)

β선은 −전기를 띠였으므로 전기마당과 반대방향으로 기울어진다.

γ선은 전기를 띠지 않았으므로 곧추 나간다.

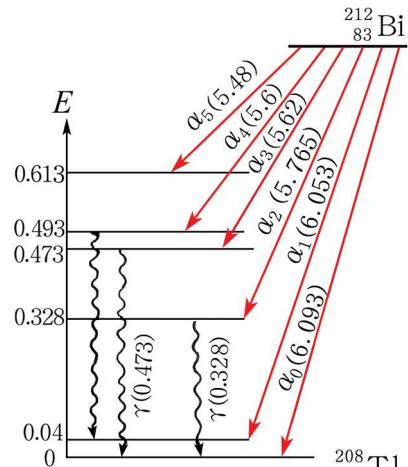
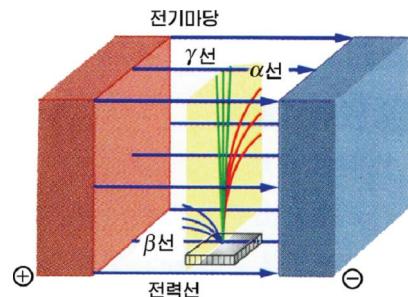



그림 6-22

문 제

1. 방사선의 특성을 다음의 표에 써넣어라.

방사선	α선	β선	γ선
기호			
본성			
전기 및 자기마당의 영향			
이온화능력	1		1/10 000
물질을 뚫고나가는 능력		100	

표에서 α립자의 이온화능력을 1로 보았다.

2. γ선은 왜 물질을 잘 뚫고 지나가며 이 성질을 어디에 리용할수 있는가?
3. α선, β선, γ선가운데서 어느 선이 원자를 더 잘 이온화시키며 그 까닭은 무엇인가?

제 5 절. 방사성붕괴법칙

자연계에 존재하는 많은 종류의 원자핵들은 안정하여 방사선을 내보내지 않지만 일부 원자핵들은 외부작용을 받지 않아도 스스로 방사선을 내보낸다.

방사선을 내보낸 방사성물질은 어떻게 변하겠는가.

방사성붕괴와 변위규칙

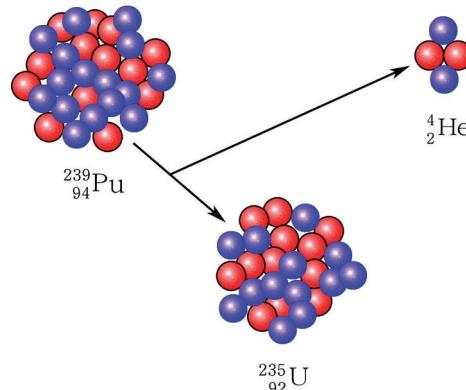
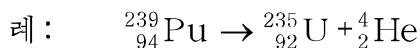
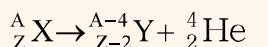
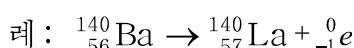
방사성원소의 불안정한 핵이 방사선을 내보내면서 다른 핵으로 넘어가는것을 **방사성붕괴**라고 부른다.

방사성붕괴에는 세가지 형태가 있다.

α붕괴. 원자핵이 α 립자를 내보내고 다른 핵으로 되는 방사성붕괴를 **α붕괴**라고 부른다.

원자핵이 α 립자를 내보내면 핵의 전하수는 2만큼, 질량수는 4만큼 줄어든다.(그림 6-23)

례: $^{239}_{94}Pu \rightarrow {}^{235}_{92}U + {}^{4}_{2}He$

그림 6-23. α붕괴

α 붕괴전후에 질량수와 전하수가 보존된다는것을 고려하면 α 붕괴의 일반식은 다음과 같다.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$$ **α붕괴식**

X: 붕괴전 원자핵

Y: 붕괴후 원자핵

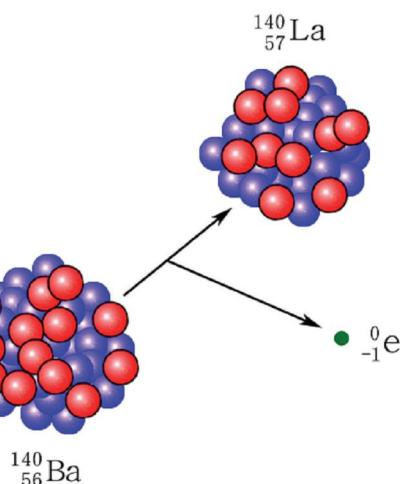
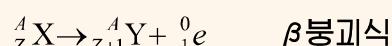
β붕괴. 원자핵이 β 립자를 내보내고 다른 핵으로 전환되는것을 **β붕괴**라고 부른다.

전자의 질량수가 령이므로 원자핵이 β 립자를 내보내면 핵의 질량수는 변하지 않고 전하수만 1만큼 커진 동중핵으로 된다.(그림 6-24)

례: $^{140}_{56}Ba \rightarrow {}^{140}_{57}La + {}^{0}_{-1}e$

β 붕괴는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

$$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$$ **β붕괴식**

그림 6-24. β붕괴

※ β붕괴에는 전자($_{-1}^{0}e$)를 내보내는 β^-붕괴와 양전자($_{+1}^{0}e$)를 내보내는 β^+붕괴, 전자층의 전자를 포획하는 전자포획이 속한다.

γ붕괴. α붕괴 혹은 β붕괴후 새로 생긴 원자핵들은 불안정한 상태에 있게 되며 이 핵들은 안정한 상태로 넘어가면서 γ량자를 내보낸다.

려기된 원자핵이 보다 낮은 려기상태 또는 바닥상태로 이행하면서 빛량자를 방출하는 현상을 **γ붕괴** 혹은 **γ복사**라고 부른다.

γ붕괴를 할 때 전하수와 질량수는 모두 변하지 않는다.

γ붕괴는 다음과 같이 표시된다.

$$_{Z}^{A}X \rightarrow _{Z}^{A}X + \gamma$$ **γ복사식**

실례로 토리움 $_{90}^{228}Th$는 α립자를 내보내고 라디움 $_{88}^{224}Ra$으로 되는데 이때 생긴 라디움 $_{88}^{224}Ra$는 불안정한 상태에 있다가 안정한 상태로 넘어가면서 γ량자를 내보낸다.

이상의 내용을 종합하면 방사성붕괴에 대한 다음과 같은 **변위규칙**을 얻는다.

첫째로, α붕괴를 일으키면 전하수는 2만큼, 질량수는 4만큼 줄어든다.

둘째로, β붕괴를 일으키면 질량수는 변하지 않으며 전하수는 1만큼 늘어난다.

셋째로, γ선을 내보낼 때에는 전하수와 질량수가 변하지 않는다.

넷째로, 방사성붕괴의 전후에 질량수와 전하수는 보존된다.

방사성붕괴법칙

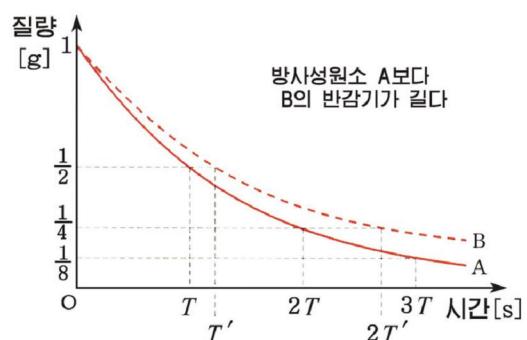
방사성원자핵들은 방사성붕괴되면 다른 핵으로 전환되므로 그 방사성원자핵의 개수가 줄어든다.

방사성원자핵이 얼마나 빨리 붕괴되는가를 반감기와 방사능으로 표시한다.

핵이 붕괴되여 원자핵의 수가 절반으로 줄어드는데 걸리는 시간을 **반감기**라고 부른다.

주어진 방사성물질에서 반감기는 항상 일정하다.(그림 6-25)

그림 6-25. 시간에 따르는 방사성물질의 량의 변화

반감기는 방사성원소의 종류에 따라 다르며 반감기가 길수록 핵은 천천히 붕괴된다.

몇가지 방사성물질의 반감기

핵	반감기	핵	반감기	핵	반감기
$^{238}_{92}U$	4.5×10^{9}a	$^{226}_{88}Ra$	1 620a	$^{24}_{11}Na$	15.06h
$^{11}_{6}C$	20.4min	$^{60}_{27}Co$	5.2a	$^{9}_{3}Li$	0.89s
$^{14}_{6}C$	5 720a	$^{222}_{86}Rn$	3.83d	$^{212}_{84}Po$	2×10^{-7}s

방사성물질이 방사선을 내는 능력을 **방사능**이라고 부른다.

방사능은 1s동안에 붕괴되는 원자핵의 수로 결정한다.

방사능의 단위는 1 Bq (**베크렐**)이다. 1Bq은 방사성물질에서 1s동안에 붕괴되는 핵의 수가 하나일 때의 방사능의 크기와 같다. 즉

그림 6-26. 시간에 따르는 방사능의 변화

$$1\,\text{Bq} = 1\text{s}^{-1}$$

주어진 방사성물질의 량이 많을수록 그 물질의 방사능이 크며 시간이 지남에 따라 점차 작아진다.(그림 6-26)

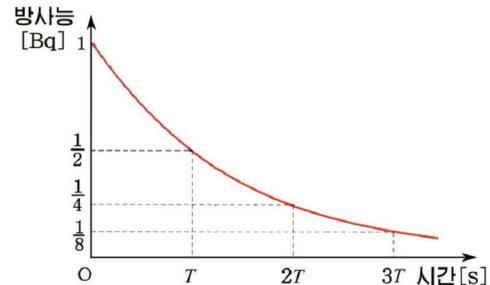
이로부터 다음의 결론을 내릴수 있다.

모든 방사성물질들은 자기의 고유한 반감기를 가지는데 반감기가 지나면 물질의 량과 방사능이 절반으로 줄어든다. 이것을 **방사성붕괴법칙**이라고 부른다.

방사성붕괴법칙을 반감기 T로 표시하면 다음과 같다.

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$$ **방사성붕괴법칙**

N : t시간후 남은 방사성원자핵의 수

N_0 : 처음방사성원자핵의 수

방사성붕괴법칙을 리용하면 지구의 나이를 비롯하여 오랜 력사유물들과 시편들의 제작년도를 알아낼수 있다.

우리 나라의 원시조인 단군의 반만년의 력사도 이런 방법으로 확증하였다.

방사성계렬

? 방사성물질이 내는 방사선에는 왜 세개의 성분이 동시에 나타나는가.

한 방사성원자핵이 α붕괴(혹은 β붕괴)를 하면 변위규칙에 따라 새로 생긴 원자핵도 불안정한 방사성핵이 되므로 계속 붕괴되면서 방사선을 내며 이러한 붕괴는 안정한 동위원소핵이 될 때까지 계속된다.

방사성원소가 계속 붕괴되여 안정한 동위원소가 얻어질 때까지 변하는 과정을 나타내는 계렬을 **방사성계렬**이라고 부른다.

방사성계렬에는 4가지가 있다.

방사성계렬	출발원소	마감원소
우라니움계렬	${}^{238}_{92}\mathrm{U}$	${}^{206}_{82}\mathrm{Pb}$
토리움계렬	${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$	${}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$
악티니움계렬	${}^{235}_{92}\mathrm{U}$	${}^{207}_{82}\mathrm{Pb}$
넵투니움계렬	${}^{241}_{94}\mathrm{Pu}$	${}^{209}_{83}\mathrm{Bi}$

※ 여기서 넵투니움계렬은 인공적으로 얻은 초우라니움원소인 풀루토니움 ${}^{241}_{94}\mathrm{Pu}$에서 시작되는 인공방사성계렬이다.

문 제

1. 다음의 문장에서 옳은 문장을 찾아라.

   ㄱ) 방사성물질의 량이 줄어들수록 반감기와 방사능이 줄어든다.

   ㄴ) 방사성물질의 량이 줄어들수록 반감기는 줄어든다.

   ㄷ) 방사성물질의 량이 줄어들수록 방사능이 줄어든다.

   ㄹ) 방사성물질의 량이 줄어들어도 반감기는 변하지 않는다.

2. 방사성계렬에서 토리움계렬은 ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$에서 시작하여 ${}^{208}_{82}\mathrm{Pb}$에서 끝난다.

   이 과정에 α붕괴와 β붕괴는 각각 몇번씩 있었겠는가?

3. 악티니움계렬에서 α붕괴와 β붕괴는 각각 몇번씩 있겠는가?

4. 방사성동위원소 ${}^{210}_{83}\mathrm{Bi}$는 β붕괴하며 반감기가 5d이다. 현재 동위원소량의 16배이던 때는 며칠전이였겠는가?

제 6 절. 방사선의 측정과 리용

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《방사성동위원소와 방사선의 리용도 중요한 의의를 가지고있습니다.》

위대한 령도자 **김정일**대원수님의 유훈은 받들고 오늘 우리 나라에서는 공업과 농촌경리, 의학과 생물학 등 과학연구와 인민경제 여러 부문들에서 방사성동위원소와 방사선을 널리 리용하고있다.

방사선은 눈으로 볼수도 없으며 사람에게 그 어떤 느낌도 주지 않는다. 그러면 방사선을 측정하는 방법은 없겠는가.

방사선의 측정

방사선을 측정하려면 방사선과 물질과의 호상작용(이온화작용, 형광작용, 사진작용, 화학작용)을 리용하여야 한다.

방사선을 측정하는 장치들로서는 형광계, 셈관, 안개함 등이 있다.

형광계. 형광계는 방사선의 형광작용을 리용하여 α립자를 기록하는 측정장치이다.(그림 6-27)

그림 6-27. 형광계의 구조

형광계는 밑판에 형광판이 설치되여있고 그우의 공간에 α립자를 내보내는 방사성물질을 설치하게 되여있다.

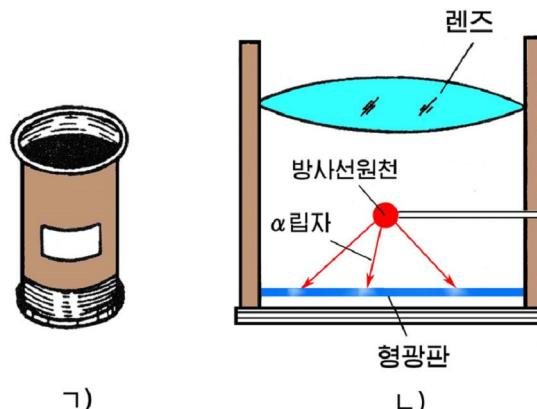
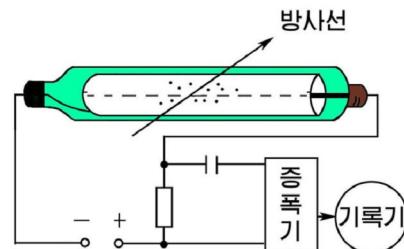
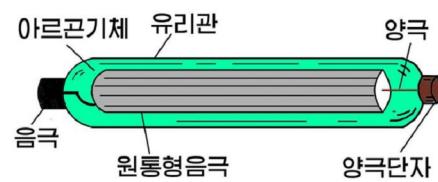
형광판에 방사선립자들이 충돌하면 그곳에서 형광이 나타난다. 그것을 확대경으로 보면서 방사선립자의 수를 셀수 있다.

※ β립자와 γ량자는 너무 약한 형광을 일으키므로 거의나 볼수 없다.

셈관. 셈관은 방사선의 이온화작용을 리용하여 β립자나 γ량자를 측정하는 가장 널리 쓰이는 방사선측정장치이다.(그림 6-28)

그림 6-28. 셈관의 구조와 작용

셈관은 유리관속에 금속으로 된 원통모양의 음극과 원통속의 가운데에 늘인 금속선으로 된 양극으로 되여있다.

관속의 공기를 뽑고 할로겐이나 아르곤 등의 기

체를 10^4Pa정도로 넣으며 두 극사이에 저항 R를 통하여 높은 전압을 걸어준다.

방사선이 셈관을 지나면 기체원자가 전기를 띠면서 두 전극사이에서 가속되여 센 전류가 흐르며 저항 R에서 전압강하가 생긴다. 이 전압을 증폭하여 기록기로 기록한다.

안개함. 안개함은 방사선이 지나간 자리길을 눈으로 볼수 있는 방사선측정장치이다. 안개함의 구조는 그림 6-29와 같다.

수증기가 차있는 그릇안에 있는 방사성물질로부터 방사선이 나온다.

고무압축기를 가만히 눌렀다가 갑자기 놓으면 그릇속의 수증기가 단열팽창되면서 온도가 이슬점아래로 내려간다. 이때 방사선립자가 지나가면 그 자리길을 따라 흰 이슬(안개)이 생긴다. 이온화능력이 α, β, γ 립자에 따라 서로 다르므로 안개함안에 생긴 자리길을 조사하여 방사선의 질량, 전기량, 에네르기 등을 알아낼수 있다.(그림 6-30)

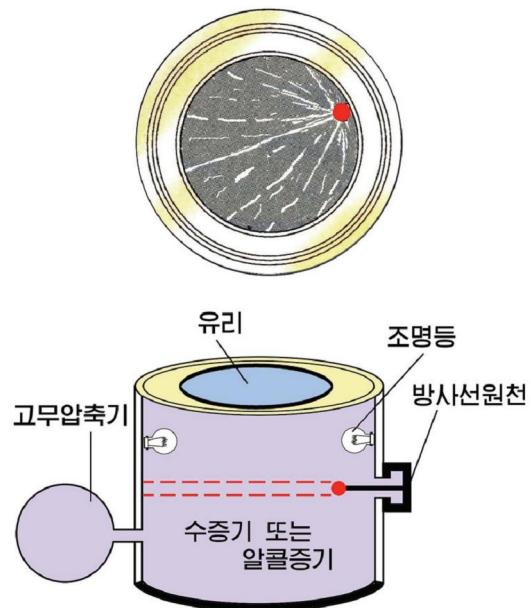



그림 6-29. 안개함의 구조

그림 6-30. 안개함으로 본 α, β, γ선의 자리길

즉 안개줄의 길이에 의하여 방사선립자의 에네르기를 알수 있고 전기 및 자기마당을 걸어주어 그것이 구부러지는 방향에 의하여 립자의 전기량과 부호, 질량 등을 평가할수 있다.

방사성동위원소와 방사선의 리용

방사성동위원소의 리용. 방사성동위원소는 보통의 화학원소와 화학적성질이 꼭같으며 다만 방사선을 내보내는 성질을 더 가진다.

그러므로 방사성동위원소가 매우 적게 섞여있어도 그 자리를 알수 있다. 이처럼 원소가 있는 자리를 알려주는 역할을 하는 원자를 **표식원자**라고 부른다.

표식원자는 생물학과 농업, 의학부문을 비롯한 과학기술분야에서 중요하게 쓰인다.

식물에서 영양물질을 이루는 개별적원소들이 어떻게 움직이며 사람이나 동물의 몸안에서 영양물질이 어떻게 흡수되는가 하는것을 표식원자를 쓰면 구체적으로 알아볼수 있다.

그림 6-31. 몸안에서의 방사성동위원소

실례로 종처에 요드가 많이 모이는 성질을 리용하여 방사성동위원소 $^{131}_{53}\mathrm{I}$가 들어있는 요드를 환자에게 먹이고 그 행처를 찾아보면 종처나 염증, 암부위와 같은 병상태를 확진할수 있다.(그림 6-31)

방사선의 리용. 방사선이 물질을 뚫고 지나갈 때 방사선의 세기가 약해지는 성질을 리용하여 금속제품의 결함, 제품의 두께, 밀도, 액면의 높이 등을 측정한다.(그림 6-32)

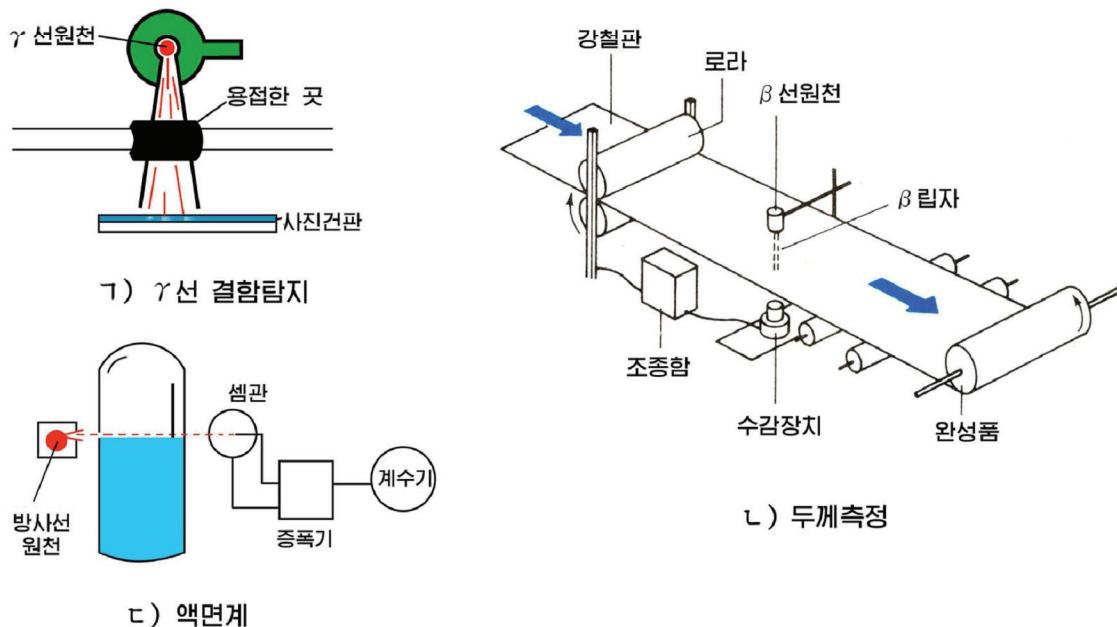



그림 6-32. 방사선의 리용

또한 방사선이 물질과 작용하면 그의 화학적 및 생물학적변화가 일어나는 성질을 생물학, 농학, 화학, 의학부문에서 많이 리용한다. 실례로 화학공업부문에서 높은 온도와 압력에서 실현되던 폴리에틸렌의 합성에 방사선을 쪼이면 보다 낮은 온도와 압력에서도 실현할수 있다. 농업부문에서 종자나 식물체에 방사선을 쪼이면 갑작변이가 일어나 새 품종을 얻거나 성장속도와 수확고를 높일수 있고 의학부문에서는 방사선으로 인체의 세포를 파괴하는 방법으로 종처나 암을 치료한다.

이처럼 방사선은 긍정적인 영향을 주지만 생명체에 작용하면 인체를 파괴하고

사람들의 수명을 줄이게 하는 등 부정적인 영향도 주게 된다. 그러므로 방사선의 피해를 막기 위하여 방사성물질의 보관관리를 잘하여야 한다.(그림 6-33)

보통 방사성물질은 연통을 비롯한 보관함에 넣어서 보관하며 공업적으로는 방사성물질을 원격조종으로 다룬다.

방사성물질을 사람들이 직접 다룰 때에는 반드시 방사선이 몸에 닿지 않도록 하여야 한다.

방사성동위원소와 방사선은 과학과 기술이 발전함에 따라 그 리용범위가 더욱더 넓어질것이다.

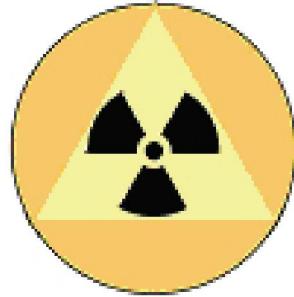



그림 6-33. 방사성표시

[례제] γ선의 원천인 $^{60}_{27}Co$를 용광로의 안벽에 설치하였는데 그것이 쇠물에 섞여나온다. 이것은 무엇을 의미하며 어떤 대책이 필요한가?

풀이. 이것은 로안벽이 부식되기 시작하였다는것을 의미한다.

로안벽의 부식정도가 허용범위를 벗어나면 엄중한 사고를 일으키므로 이때에는 로안벽을 보수하여야 한다.

문 제

1. 형광계는 방사선의 어떤 성질을 리용하였으며 어떤 립자를 알아낼수 있는가?
2. 액면계의 그림을 보고 액면계의 원리를 설명하여라. 련통관의 원리를 리용한 액면계보다 어떤 측면에서 좋은가?
3. 병원에서 진단과 치료에 쓰는 방사성물질은 같은가, 다른가?

제7절. 핵 반 응

화학반응에 의해서는 한 원자를 다른 원자로 변화시킬수 없다. 원자를 변화시키려면 원자핵을 변환시켜야 한다.

방사성붕괴는 불안정한 핵이 보다 안정한 다른 핵으로 변환되는 과정이다.

그러면 인공적으로 한 핵을 다른 핵으로 변환시킬수 없겠는가.

핵반응과정

핵자들사이의 결합력은 대단히 크며 핵력은 매우 가까운 거리에서만 작용하므로 원자핵을 쉽게 변환시킬수 없다. 그러나 원자핵도 양성자나 중성자와 같은 어떤 립자로 때리면 다른 핵으로 변환될수 있다. 이처럼 원자핵을 α립자나 양성자, 중성자와 같은 립자로 때려서 다른 원자핵으로 변환시키는것을 **핵반응**이라고 부른다.

핵반응은 두 단계를 거쳐 일어난다.

처음 α립자나 양성자, 중성자와 같은 립자가 핵에 부딪쳐 흡수되면서 불안정한 중간핵(복합핵)으로 려기된다. 이것이 핵반응의 1단계이다.(복합핵의 형성과정)

복합핵은 불안정하므로 다른 립자를 내보내고 새로운 핵으로 붕괴된다.(복합핵의 붕괴과정) 이리하여 처음 핵이 새로운 핵으로 변하는 핵반응이 끝난다.

력사상 처음으로 실현된 핵반응은 양성자 발견핵반응이다.

α립자로 질소핵을 때리면 새로운 복합핵인 불소핵으로 려기되였다가 다시 양성자를 내보내면서 새로운 산소원자핵으로 변환된다.(그림 6-34)

$${}^{14}_{7}N+{}^{4}_{2}He \rightarrow ({}^{18}_{9}F) \rightarrow {}^{17}_{8}O+{}^{1}_{1}H$$

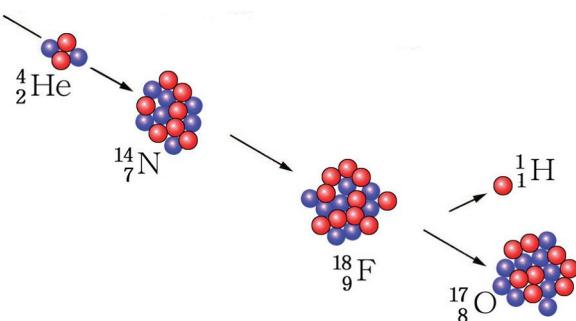
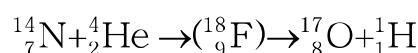



그림 6-34. 핵반응과정

핵반응에네르기

우의 핵반응에서 보는것처럼 핵반응과정에 전하수와 질량수가 보존된다. 그러나 반응전 원자핵들의 결합에네르기의 합과 반응후 원자핵들의 결합에네르기의 합은 같지 않다. 이처럼 핵반응전과 후의 결합에네르기차를 **핵반응에네르기**라고 부른다.

두 원자핵 A, B가 반응하여 새로운 두 원자핵 C, D가 생겼다고 하자.

그러면 핵반응에네르기는 $Q=(E_C+E_D)-(E_A+E_B)$로 된다.

아인슈타인의 공식에 의하면 핵반응전후의 질량결손에 해당한 에네르기가 곧 핵반응에네르기로 된다.(그림 6-35)

즉

$$Q=(E_C+E_D)-(E_A+E_B)=[(m_A+m_B)-(m_C+m_D)]c^2 \text{ 핵반응에네르기}$$

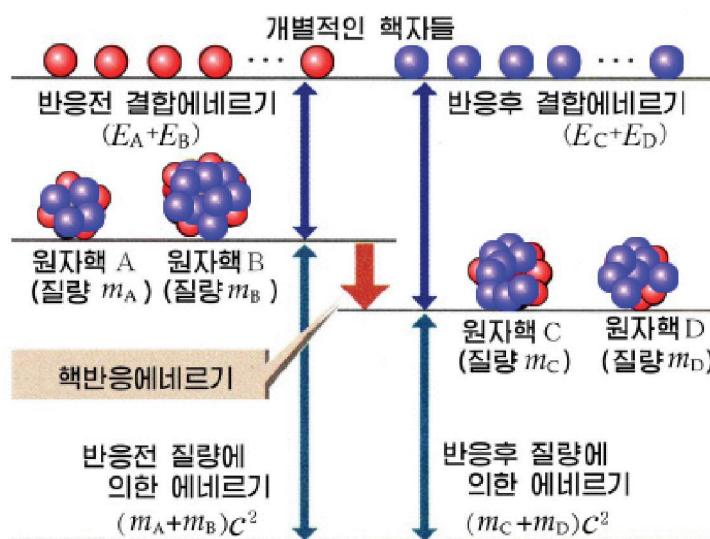



그림 6-35. 핵반응에네르기

핵반응과정에 나오는 에네르기를 고려해보면 핵반응에서 에네르기보존법칙이 성립한다는것을 알수 있다.

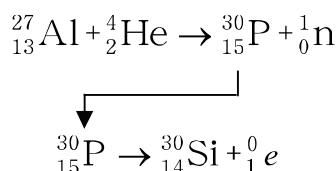
핵반응에는 핵반응과정에 많은 에네르기를 얻기 위한 무거운 핵의 분렬반응과 가벼운 핵의 융합반응이 있다.

여러가지 핵반응실례

지금까지 연구된 핵반응의 수는 수천가지이다. 수천가지의 핵반응중에서 흥미있는 핵반응들을 몇가지 보자.

력사상 처음으로 실현한 핵반응은 1919년 라자포드에 의하여 진행된 양성자(수소핵)발견핵반응이다.

그림 6-36. 양성자발견실험장치

이 핵반응에서는 방사성원소에서 나오는 α립자를 리용하였다.(그림 6-36)

진공뽐프로 통안의 공기를 빼고 현미경으로 형광판을 보면 섬광이 나타나지 않는다.

그것은 투과력이 작은 α립자가 형광판앞에 놓인 금속판에 흡수되였기때문이다. 그러나 통안에 질소기체를 넣으면 형광판에는 곧 섬광이 나타난다. 이때 통속에는 산소원자핵이 생기는데 이것은 질소원자핵이 헬리움원자핵과 충돌하여 어떤 립자를 내보내고 산소원자핵으로 변했기때문이다. 형광판에 충돌한 립자를 전기마당과 자기마당을 통하여 조사해보면 가장 가벼운 수소원자핵($^1_1$H)과 같다는것을 알수 있다.

새로운 립자를 발견한 핵반응의 실례는 1932년에 챠드위크가 진행한 중성자발견핵반응이다.(그림 6-37)

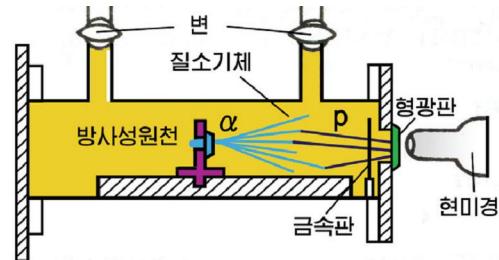
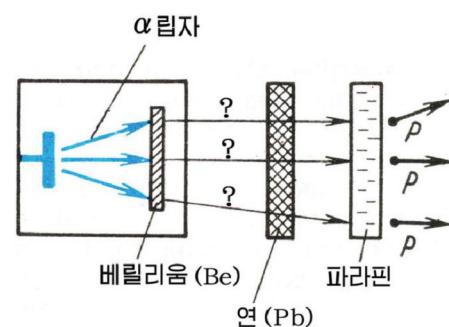
그림 6-37. 중성자발견실험장치

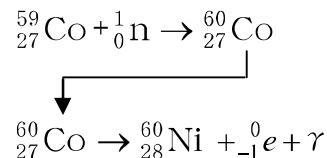
또한 1934년에 양전자를 발견한 핵반응이 실현되였다. 이 핵반응은 두 과정에 걸쳐 이루어진다. 먼저 알루미니움동위원소 $^{27}_{13}$Al에 α립자를 타격하면 자연계에 없는 린의 동위원소 $^{30}_{15}$P가 생긴다.

이 핵은 불안정한 방사성핵으로서 양전자를 내보내고 붕괴되여 규소의 안정한 동위원소 $^{30}_{14}$Si로 전환된다. 붕괴식은 다음과 같다.

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P}+^{1}_{0}\mathrm{n}$$

$$^{30}_{15}\mathrm{P}\rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si}+^{0}_{1}e$$

이 방사성린의 반감기는 130.6s이다.

우의 핵반응으로 양전자가 발견된 후 원자핵안에서 양전자가 어떻게 나타나는가를 알아내기 위한 실험이 활발히 진행되였으며 이 과정에 거의 모든 원소들의 핵반응결과에 새로운 인공방사성동위원소를 얻을수 있다는것이 밝혀졌다.

인공방사능의 발견은 인공적으로 방사성동위원소를 얻어 널리 리용할수 있는 길을 열어주었다.

인공방사성동위원소를 얻기 위한 핵반응의 실례를 하나 들어보자.

자연계에 있는 코발트의 동위원소는 ${}^{59}_{27}\mathrm{Co}$ 하나뿐이다.

안정한 이 핵에 중성자를 쏘아넣으면 질량수가 하나 더 큰 ${}^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 핵으로 된다.

이 핵은 전자와 γ 량자를 내보내고 니켈핵으로 된다.

즉

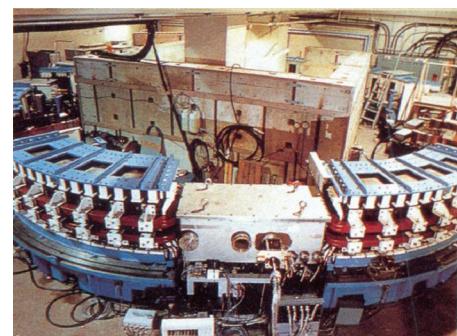
$$ {}^{59}_{27}\mathrm{Co} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{60}_{27}\mathrm{Co} $$

$$ {}^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\mathrm{Ni} + {}^{0}_{-1}e + \gamma $$

${}^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 의 반감기는 5.2a이므로 려기상태에 오래동안 있게 되여 이 동위원소는 γ 선이나 β 선을 내보내는 방사선원천으로 널리 쓰인다.

핵반응을 일으키기 위하여 원자핵을 타격하는 립자에는 α 립자, 중성자, 양성자, 중수소핵 등이 있다. 중성자는 전기적으로 중성이므로 핵으로부터 전기적밀힘을 받지 않으며 핵에 쉽게 접근할수 있다. 특히 느린 중성자들은 빠른 중성자에 비하여 핵에 잘 흡수된다.

그림 6-38. 가속장치

양성자나 α 립자는 원자핵에 가까이 갈수록 센 전기적밀힘을 받기때문에 그것을 극복할만 한 에네르기를 가져야 핵반응을 일으킬수 있다. 그러므로 양성자나 α 립자, 중수소핵은 가속장치에서 가속시켜 핵반응에 리용한다.(그림 6-38)

핵반응의 구분

핵반응은 사명과 타격하는 립자에 따라 다음과 같이 구분한다.

핵반응의 사명에 따라

① 새로운 립자를 발견하기 위한 핵반응
② 방사성동위원소를 얻기 위한 핵반응
③ 많은 에네르기를 얻기 위한 핵반응
 ○ 가벼운 핵의 융합반응
 ○ 무거운 핵의 분렬반응

핵을 타격하는 립자에 따라

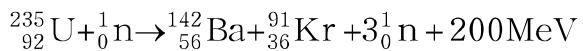
① α 립자에 의한 핵반응
② 중성자에 의한 핵반응
③ 양성자에 의한 핵반응
④ 중수소핵에 의한 핵반응

문 제

1. 방사성붕괴에 의해서도 핵변환이 일어나고 핵반응에 의해서도 핵변환이 일어난다. 어떤 차이가 있는가?
2. 다음의 핵반응식을 완성하여라.
   ㄱ) $^{14}_{7}N+\square\rightarrow^{11}_{5}B+^{4}_{2}He$
   ㄴ) $^{27}_{13}Al+\square\rightarrow^{30}_{15}P+^{1}_{0}n$
   ㄷ) $^{7}_{3}Li+\square\rightarrow2^{4}_{2}He$
3. 정지하고있던 원자핵 $^{6}_{3}Li$에 에네르기가 작은 중성자 $^{1}_{0}n$을 충돌시켜 헬리움원자핵과 초중수소핵을 얻었다. 핵반응식을 쓰고 반응에서 나오는 에네르기를 구하여라. $^{6}_{3}Li$의 질량은 6.015 13D, $^{1}_{0}n$의 질량은 1.008 67D, $^{4}_{2}He$의 질량은 4.002 6D, $^{3}_{1}H$의 질량은 3.016D이다.

제 8 절. 핵분렬반응

인민경제의 여러 부문에서 늘어나는 동력에 대한 수요를 원만히 보장하려면 원자력을 비롯한 여러가지 새로운 동력자원에 의거하여야 한다.

무거운 핵의 분렬

1938년에 느린 중성자로 우라니움 $^{235}_{92}U$를 타격할 때 우라니움핵이 두쪼각으로 갈라지며 2~3개의 중성자가 나온다는것이 알려졌다.

이처럼 무거운 원자핵이 서로 비슷한 질량수를 가진 두개의 원자핵으로 갈라지는 핵반응을 **핵분렬반응**이라고 부른다.

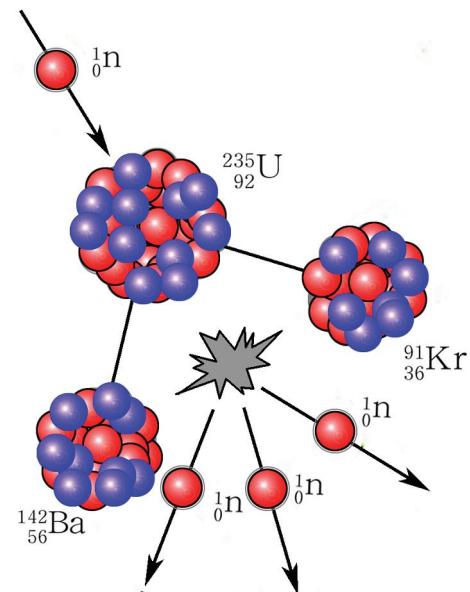
핵분렬반응에서는 많은 에네르기를 내보낸다.

실례로 우라니움 $^{235}_{92}U$핵을 중성자로 타격하면 바리움과 크립톤핵으로 갈라지면서 2~3개의 중성자와 약 200MeV의 에네르기가 나온다.(그림 6-39)

핵반응식은 다음과 같다.

$$^{235}_{92}U+^{1}_{0}n\rightarrow^{142}_{56}Ba+^{91}_{36}Kr+3^{1}_{0}n+200MeV$$

그림 6-39. 우라니움의 핵분렬반응

이때 나오는 에네르기는 우라니움핵이 보다 더 안정한 핵으로 되면서 내보내는 에네르기이다.

핵분렬이 일어날 때 몇개의 중성자가 나오는것은 다음과 같이 설명된다.

무거운 핵은 양성자들사이의 전기적밀힘을 줄이기 위해 가벼운 핵보다 상대적으로 양성자보다 중성자를 더 많이 가지고있다. 그러므로 핵이 갈라져 가벼운 핵들로 되면 몇개의 중성자가 남게 된다. 그러므로 핵분렬할 때 중성자가 밖으로 나오게 된다.

핵분렬련쇄반응

핵분렬때 나오는 에네르기를 동력으로 쓰려면 많은 핵들을 련달아 분렬시켜야 한다.

실례로 한개 우라니움핵이 분렬될 때 나오는 2~3개의 중성자로 다른 우라니움핵을 때리면 그 핵이 분렬되면서 역시 2～3개의 중성자가 나온다. 이 중성자는 또 다른 우라니움원자핵을 분렬시킨다.(그림 6-40)

그림 6-40. 핵분렬련쇄반응

이처럼 핵이 분렬될 때 나오는 중성자가 다른 핵을 분렬시키고 그때 나오는 중성자가 또 다른 핵을 분렬시키는 방법으로 핵분렬이 사태처럼 련달아 일어나는 핵반응을 **핵분렬련쇄반응**이라고 부른다.

핵분렬련쇄반응을 일으키려면 어떻게 해야 하는가.

천연우라니움에는 $^{235}_{92}U$가 0.72%로 적게 들어있고 $^{238}_{92}U$이 99.27%로 많이 들어있다.

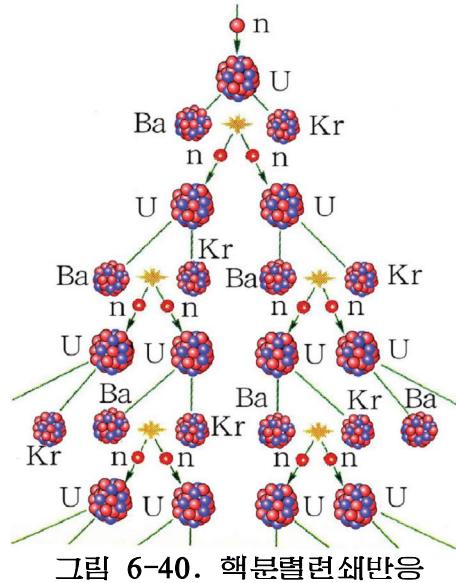
그런데 $^{238}_{92}U$ 는 핵분렬때 나오는 빠른 중성자를 세게 흡수하여 다른 핵으로 전환될뿐 핵분렬을 일으키지 않으므로 핵분렬련쇄반응의 장애로 된다.

오직 $^{235}_{92}U$만이 핵분렬에 참가하므로 천연우라니움을 그대로 쓰지 않고 $^{235}_{92}U$의 비률을 높여서 써야 한다. 이처럼 천연우라니움에서 $^{235}_{92}U$의 비률을 높이는것을 **우라니움농축**이라고 부른다.

우라니움농축을 실현하는것은 핵분렬련쇄반응을 실현하기 위하여 나서는 중요한 문제의 하나이며 또 기술적으로 가장 힘든 문제의 하나이다.

$^{235}_{92}U$ 와 $^{238}_{92}U$ 은 화학적성질이 같으므로 질량차에 의한 확산법이나 원심분리법을 리용하여 갈라낸다. 우라니움 $^{235}_{92}U$ 핵이 분렬될 때 생기는 중성자들은 $^{235}_{92}U$ 덩어리가 너무 작으면 다른 $^{235}_{92}U$ 와 부딪치지 못하고 밖으로 나가버리며 또는 $^{238}_{92}U$ 에 흡수되기도 한다. 그러므로 핵분렬련쇄반응이 일어나자면 핵분렬물질의 순도가 높아야 하는것과 함께 그 질량이 일정한 값보다 더 커야 한다.

이처럼 핵분렬련쇄반응을 일으키는데 필요한 최소한의 질량을 **림계질량**이라고 부른다.

림계질량은 핵분렬물질에 따라 다르다.

이밖에도 $^{235}_{92}U$가 느린 중성자에 의하여 분렬이 아주 잘 일어나므로 핵분렬될 때 생기는 빠른 중성자를 열운동속도정도의 느린 중성자로 감속시킬수도 있다.

중성자의 속도를 감속시키는 물질을 **감속재**라고 부른다.

※ 열운동속도정도의 느린 속도를 가진 중성자를 **열중성자**라고 부르기도 한다.

※ 고농축우라니움을 쓸 때에는 중성자를 감속시키지 않아도 $^{235}_{92}U$는 잘 분렬된다.

순수한 $^{235}_{92}U$ 1kg속에 들어있는 핵이 모두 분렬될 때 8×10^{13}J 의 에네르기가 나오며 이 에네르기는 약 4 000t의 석탄이 탈 때 나오는 에네르기와 맞먹는다.

원자력의 리용

원자탄. 핵분렬련쇄반응은 1μs(10^{-6}s)사이에 일어나며 짧은 시간사이에 방대한 에네르기가 나온다.

핵분렬련쇄반응때 나오는 에네르기를 리용하여 만든 폭탄을 **원자탄**이라고 부른다.(그림 6-41)

그림 6-41. 원자탄의 구조와 폭발

원자탄속에는 순도가 높은 고농축우라니움이 림계질량보다 작게 여러 쪼각으로 나뉘여 들어있다. 우라니움을 둘러싸고있는 화약을 폭발시켜 우라니움쪼각들을 합쳐놓으면 덩어리의 질량이 림계질량을 넘게 되여 핵분렬련쇄반응이 일어난다.

과학이 발전하면서 고농축우라니움을 리용한 원자탄과 이밖에 플루토니움을 비롯한 방사성원자핵을 리용한 원자탄들이 나오고있으며 그 크기도 훨씬 작아지고있다.

핵연료

천연우라니움속에 있는 동위원소들가운데서 99.27%를 차지하는 $^{238}_{92}U$은 핵반응과정에 중성자를 포획하여 $^{239}_{92}U$로 전환된다. $^{239}_{92}U$는 두번 β붕괴하여 $^{239}_{94}Pu$로 된다. 즉

$$^{238}_{92}U+^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta붕괴} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta붕괴} ^{239}_{94}Pu$$

이때 생기는 $^{239}_{94}Pu$도 $^{235}_{92}U$와 꼭같이 중성자에 의하여 핵분렬을 일으키는 좋은 핵연료이다.

또한 $^{232}_{90}Th$도 중성자를 흡수하고 두번 β붕괴하면 $^{233}_{92}U$이 얻어지는데 이것 역시 핵연료이다.

그러므로 원자핵분렬과정에 많은 에네르기뿐아니라 좋은 핵연료도 얻을수 있다.

원자로. 핵분렬련쇄반응때 나오는 에네르기를 인민경제의 동력으로 리용하려면 련쇄반응속도를 조절하여야 한다.

련쇄반응속도를 조절할수 있도록 만든 설비를 **원자로**라고 부른다.

핵분렬련쇄반응속도를 조절하자면 련쇄반응때 생겨나는 중성자의 일부를 없애버려 단위시간동안에 분렬되는 핵의 수를 조절하여야 한다.

그러므로 원자로안에는 중성자를 흡수하여 련쇄반응속도를 조절하는 조종봉(중성자흡수물질)이 들어있다.

원자로는 핵분렬을 일으키는 중성자의 에네르기에 따라 느린중성자로, 빠른중성자로 등으로 나눌수 있다.

원자로(느린중성자로)의 구조를 그림 6-42에 보여주었다.

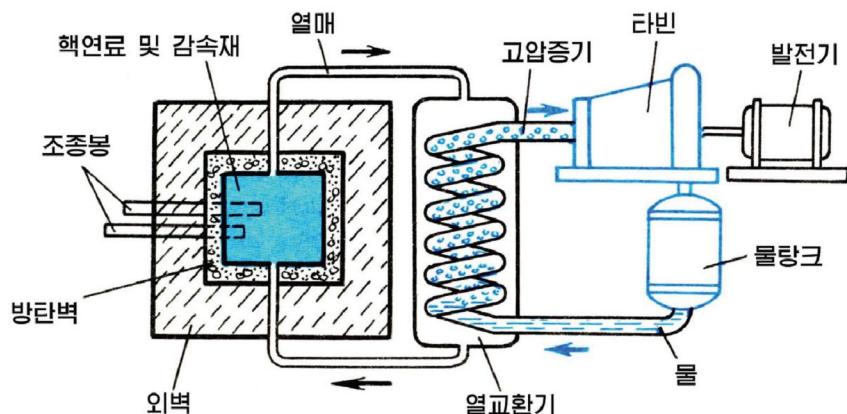



그림 6-42. 원자로의 구조

이 원자로에는 일정한 규칙에 따라 핵연료인 우라니움봉이 배치되여있고 그 둘레에 중성자를 감속시키기 위한 감속재를 넣었다.

그리고 중성자를 잘 흡수하는 물질로 만든 조종봉을 설치하였다.

중성자가 밖으로 나오는것을 막기 위하여 중성자반사물질과 방사선을 막는 연층, 두터운 콩크리트층으로 핵반응구역둘레를 막았다.

만일 중성자가 갑자기 많아지면 핵분렬련쇄반응속도가 빨라져서 사고를 일으킬수 있으므로 중성자가 너무 많이 생기면 조종봉을 깊숙이 넣어 중성자를 없앤다.

원자로에서는 이 모든 과정이 콤퓨터에 의하여 원격조종되고있다.

핵이 분렬될 때 나오는 에네르기를 랭각체계에 따라 순환시키면서 고압증기를 얻어 타빈을 돌린다.

느린중성자원자로에서는 핵연료로 천연우라니움이나 저농축우라니움, 플루토니움을 쓸수 있으며 조종봉으로는 붕소나 카드미움막대기를 쓴다.

또한 이 원자로는 감속재에 따라 흑연감속로, 경수로, 중수로, 베릴리움감속로 등으로 나눈다.

순수한 보통물 H_2O를 **경수**, 중수소핵과 산소핵으로 이루어진 무거운 물 D_2O를 **중수**라고 부른다.

최근에는 핵동력용원자로가운데서 빠른중성자를 리용하는 빠른중성자증식원자로(빠른원자로)가 추세로 되고있다.

빠른원자로는 15~20% 농축우라니움과 $^{239}_{94}Pu$ 를 연료로 쓰며 감속재를 쓰지 않는다. 또한 핵연료주변에 $^{238}_{92}U$로 둘러막아놓는다. 이때 $^{238}_{92}U$은 반응과정에 나오는 중성자를 흡수하고 핵연료로 전환되므로 소비되는 핵연료보다 더 많은 핵연료가 재생된다.

빠른원자로에서는 핵분렬과정에 생기는 빠른중성자를 감속시키지 않고 직접 우라니움이나 플루토니움연료에 포격하여 핵분렬련쇄반응을 실현한다.

오늘 원자로는 원자력발전소, 쇄빙선, 무역선, 잠수함, 항공모함 등의 동력으로 광범히 리용되고있다.(그림 6-43)

또한 원자로에서 방사선동위원소를 얻어내여 인민경제 여러 분야에 널리 리용하고있다.

그림 6-43. 원자로

우라니움 $^{235}_{92}U$ 1kg이 분렬될 때 나오는 에네르기는 얼마인가?

문 제

1. 원자로와 원자탄의 구조와 원리에서 차이는 무엇인가?
2. 하루에 220g의 우라니움 $^{235}_{92}U$ 을 소비하는 원자력발전소의 출력은 얼마인가?
   발전소의 효률은 25%이다.
3. 우라니움핵이 분렬되는 핵반응에서 $^{235}_{92}U$ 핵 1개가 중성자에 의해 분렬될 때 방출되는 에네르기를 계산하여라.
   $^{235}_{92}U$, $^{142}_{56}Ba$, $^{91}_{36}Kr$의 질량은 각각 235.043 9D, 141.913 9D, 90.897 3D이다.

제 9 절. 핵융합반응

태양이나 별들은 무엇으로 이루어졌기에 그처럼 거대한 에네르기를 내보내겠는가.

가벼운 핵의 융합

태양이나 별들에서와 마찬가지로 가벼운 원자핵들이 결합되여 보다 안정한 핵으로 될 때에는 핵분렬때보다 더 큰 에네르기가 나온다.

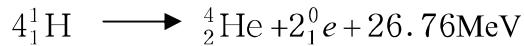
이처럼 가벼운 원자핵들이 융합되여 하나의 다른 핵으로 넘어가는 핵반응을 **핵융합반응**이라고 부른다.

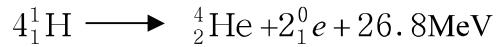
실례로 중수소핵과 초중수소핵이 융합되면 중성자를 내보내고 헬리움원자핵으로 된다.(그림 6-44)

그림 6-44. 핵융합반응

핵을 융합시키자면 그것들을 핵력의 작용범위까지 접근시켜야 한다.

그런데 핵은 ＋전기를 띠고있으므로 그들사이에는 전기적밀힘이 작용한다.

이 밀힘을 극복하고 핵을 융합시키기 위하여서는 수백만K이상의 높은 온도로 가열해야 한다. 이때 큰 열운동에네르기를 가진 핵들이 충돌하면서 핵융합이 실현된다.

이런 의미에서 핵융합반응을 **열핵반응**이라고도 부른다.

결국 핵융합반응은 높은 온도조건에서 실현된다.

실제로 태양내부의 온도는 1 600만K정도로서 대단히 높으며 태양을 구성하는 물질에서 70％정도가 수소이고 20％정도가 헬리움이므로 태양에서는 핵융합반응이 일어날 조건이 충분하다는것을 알수 있다.

태양에서는 두가지 계렬의 핵융합반응에 의해 에네르기가 나온다.

첫째 계렬은 수소가 헬리움으로 넘어가는 과정인데 식을 쓰면 다음과 같다.

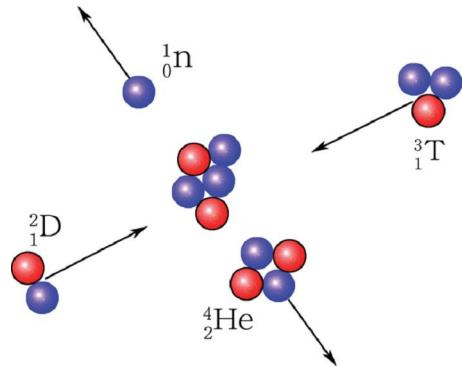
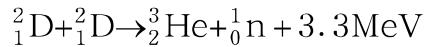
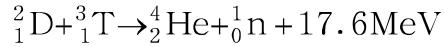
$$4^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2^{0}_{1}e + 26.76MeV$$

둘째 계렬은 수소가 탄소의 도움으로 헬리움으로 넘어가는 과정인데 반응식들을 종합하면 다음과 같다.

$$4^{1}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He + 2^{0}_{1}e + 26.8MeV$$

지구상에서 실현하기가 유리한 핵융합반응은 중수소($^{2}_{1}D$)와 초중수소($^{3}_{1}T$), 중수소($^{2}_{1}D$)와 중수소($^{2}_{1}D$)의 융합반응이다. 즉

$$^{2}_{1}D + {}^{3}_{1}T \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17.6MeV$$

$$^{2}_{1}D + {}^{2}_{1}D \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 3.3MeV$$

이 열핵반응들은 상대적으로 낮은 온도조건에서 실현된다.

인공적으로 열핵반응을 실현하려면 $10^7 \sim 10^8$K 정도의 매우 높은 온도를 얻어야 하며 $10^{14}cm^{-3}$의 밀도로 원자핵들이 집중되여있는 상태가 1s이상 유지되여야 한다.

이러한 조건은 원자탄이 폭발할 때 쉽게 이루어지므로 원자탄이 폭발할 때 생기는 높은 온도와 압력속에서 중수소와 초중수소는 핵융합반응을 일으킨다.

핵융합반응에서 생기는 에네르기를 리용하여 만든 폭탄을 **수소탄**이라고 부른다.(그림 6-45)

그림 6-45. 수소탄의 구조

같은 크기의 원자탄에 비해 수소탄은 100배의 에네르기를 낸다.

수소탄의 충격파와 열 및 빛복사에 의한 피해보다도 중성자에 의한 피해가 더 크도록 만든 소형수소탄을 **중성자탄**이라고 부른다.

중성자탄은 건물과 대상물에 대한 타격은 극히 적고 생명체에 대한 피해가 크다. 그러나 중성자탄이 폭발할 때 나오는 중성자들은 지층 1.5m정도이면 능히 막을수 있다.

※ 원자탄이나 수소탄이 폭발할 때 생기는 중성자탄은 자연계의 안정한 핵들을 방사성핵으로 전환시키므로 방사선오염지대들에서 계속 방사선이 나오며 그 피해는 오래 계속된다.

조종핵융합반응

핵융합으로 동력을 얻으려면 수소탄과는 달리 핵융합반응을 조종하여야 한다.

그러자면 핵연료를 가두어넣고 융합반응을 안정하게 오래동안 유지하여야 한다.

이것은 고온상태의 핵융합연료를 자기마당에 의해 오래동안 《진공용기》에 가두어넣고 핵융합을 일으키는 전자기가두기식핵융합방법(MCF)과 순간적으로 초고밀도상태를 조성시켜 핵융합반응을 일으키는 과정을 반복하는 레이자에 의한 관성핵융합방법(ICF)으로 해결하고있다.

전자기가두기식핵융합방법에서는 대전립자들이 운동할 때 받는 자기힘을 리용한다.(그림 6-46)

고리모양의 그릇속에 핵융합연료를 넣고 높은 온도로 가열한 다음 고리형선륜속에 센 전류를 흘려보내면 이때 생기는 자기마당에 의하여 이온상태의 립자들이 중심으로 세게 압축되여 보이

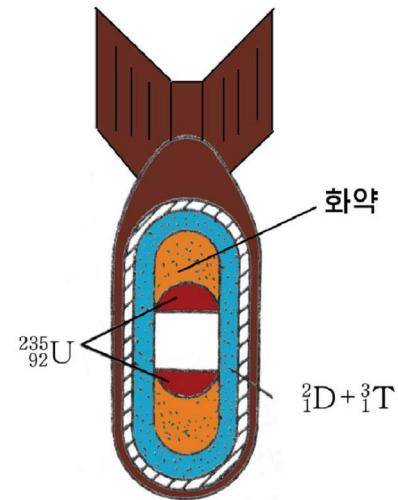
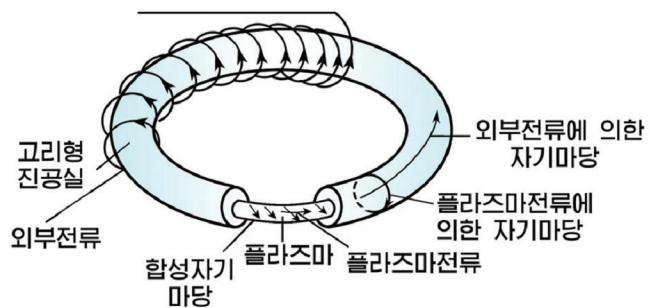



그림 6-46. 전자기가두기식핵융합방법

지 않는 열절연된 《진공용기》속에 갇혀지게 된다.

이처럼 높은 온도와 초고밀도가 보장된 연료를 뽑아내여 핵융합반응을 실현한다.

관성핵융합방법에서는 중수소와 초중수소의 고체혼합물을 구모양으로 만들어놓고 강력한 레이자빛을 쪼여 순간적으로 초고밀도와 높은 온도를 보장함으로써 핵융합반응을 실현한다.

이때 생기는 열에네르기를 뽑아내기 위해 액체리티움을 순환시키고 그것을 증기발생기를 거치게 하여 높은 온도와 압력의 증기를 얻어 타빈을 돌린다.

한편 리티움은 열핵반응과정에 생기는 높은 속도의 중성자에 의하여 헬리움과 초중수소로 전환되는데 이것을 리용하여 반응로안에서 핵연료를 생산한다.

핵융합반응을 조종하여 동력을 얻기 위한 연구는 광범한 단계에 들어섰으며 핵분렬반응과는 달리 원료자원의 제한이 없고 방사능을 가진 페기물에 의한 생태환경파괴가 없는것으로 하여 미래의 동력으로 주목되고있다.

우리 나라에서는 당의 현명한 령도밑에 최첨단과학기술의 면모를 과시하는 핵융합반응을 성공시키는 자랑찬 성과를 이룩하였다. 우리의 과학자들은 현재 발전되였다고 하는 몇개 나라에서만 시도하고있는 이 기술을 100% 자체의 힘으로 해결함으로써 우리 식의 독특한 열핵반응장치를 설계제작하고 열핵반응과 관련한 기초연구를 끝냈다. 그리하여 새 에네르기개발을 위한 돌파구가 확고하게 열리였으며 나라의 최첨단과학기술발전에서 새로운 경지가 개척되였다.

[례제] 수소핵들이 서로 맞닿으려면 평균열운동에네르기 $\overline{\varepsilon_k}=0.15\text{MeV}$를 가져야 한다. 핵융합반응을 실현하자면 얼마의 온도까지 올려야 하겠는가?

풀이. 열운동에네르기와 온도사이의 공식 $\overline{\varepsilon_k}=\frac{3}{2}kT$로부터

$$T=\frac{2\overline{\varepsilon_k}}{3k}=\frac{2\times0.15\times10^6\times1.6\times10^{-19}}{3\times1.38\times10^{-23}}\approx1\times10^9(\text{K})$$

답. 약 $1\times10^9\text{K}$

문 제

1. 조종핵융합반응과 핵융합반응이 다른 점은 무엇인가?
2. 수소탄안에 있는 원자탄은 어떤 역할을 하는가?
3. 중수소핵과 초중수소핵이 융합될 때 나오는 에네르기는 얼마인가? 중수소핵의 질량은 $m_\text{D}=2.0141\text{D}$이고 초중수소핵의 질량은 $m_\text{T}=3.016\text{D}$이다.

제 10 절. 소립자와 그 분류

인류는 오래전부터 물질이 무엇으로 이루어졌는가를 밝히려고 꾸준히 노력하여 왔다.

그리하여 물질은 원자로 이루어졌으며 원자는 전자와 핵으로, 핵은 양성자와 중성자로 이루어졌다는것을 밝혀냈다.

그렇다면 양성자와 중성자는 더는 쪼갤수 없는 립자이겠는가.

소 립 자

1930년대 중엽에 물리학자들은 모든 원자는 양성자와 중성자, 전자로 이루어져 있으며 그밖에 양전자, 뉴트리노(중성미자), 빛량자의 3개 립자가 더 존재한다는 사실에 기초하여 이 6개의 립자들을 소립자라고 불렀다.

이처럼 모든 물질의 가장 작은 구성요소로서 더는 쪼갤수 없다고 보는 립자들을 **소립자**라고 부른다.

소립자들이 큰 에네르기를 가지고 서로 혹은 원자핵과 충돌하면 여러가지 변화가 일어난다. 1930년대초까지 이것을 연구하는데 α립자를 써왔으나 그의 에네르기가 제한된것으로 하여 그것으로는 소립자들사이의 다양한 호상작용을 연구할수 없었다.

그러므로 지구밖으로부터 날아들어오는 에네르기가 큰 립자들의 흐름인 우주선을 소립자연구에 리용하였으며 우주선이 물질속을 지날 때 원자핵과 충돌하여 핵변환을 일으키므로 이 과정에 μ립자와 π중간자 등 여러가지 소립자들이 발견되였다.

또한 전기마당으로 대전립자들을 가속하여 에네르기가 큰 립자들을 얻는 립자가속기가 개발되고 핵반응과 소립자연구에 리용됨으로써 더 많은 새로운 소립자들이 발견되였으며 지금까지 200여종이 넘는 소립자들이 알려지게 되였다.

소립자의 분류

지금까지 알려진 소립자의 종류는 물질을 이루는 원소의 수보다 더 많다.

소립자들은 그의 질량, 전기량, 수명 등이 서로 다르다.

그러나 소립자들을 분류하는데서 중요한것은 질량이나 수명보다도 스핀과 호상작용형태이다.

우선 모든 소립자들은 스핀에 따라 보존(보즈립자)과 페르미온(페르미립자)으로 가를수 있다. 보즈립자는 스핀이 0 혹은 옹근수인 립자들이며 페르미립자는 스핀이 1/2 혹은 그의 홀수배인 립자들이다.

다음으로 호상작용의 형태에 따라 소립자들을 구분한다. 즉 소립자들은 약한 호상작용을 하는 립자들인 렙톤(가벼운 립자라는 뜻)과 강한 호상작용을 하는 립자들인 하드론으로 가르며 하드론은 다시 메존(중간질량을 가진 립자라는 뜻)과 바리온

(무거운 립자라는 뜻)으로 갈라진다.

이처럼 소립자들을 분류하면 다음 표와 같다.

소립자의 분류

소립자종류			소립자이름	기호	반립자	정지질량(MeV/c^2)	수명(s)
보즈립자			빛량자	γ	자체	0	안정
			w	w^+	w^-	80.6×10^3	3×10^{-25}
			z	z^0	자체	91.2×10^3	3×10^{-25}
페르미립자	렙톤		전자	e^-	e^+	0.511	안정
			뉴트리노(e)	ν_e	$\overline{\nu}_e$	0(?)*	안정
			뮤온	μ^-	μ^+	105.7	2.20×10^{-3}
			뉴트리노(μ)	ν_μ	$\overline{\nu}_\mu$	0(?)*	안정
			타이온	τ^-	τ^+	1784	3×10^{-13}
			뉴트리노(τ)	ν_τ	$\overline{\nu}_\tau$	0(?)*	안정
	하드론	메존	파이온	π^+	π^-	139.6	2.60×10^{-8}
				π^0	자체	135.0	0.84×10^{-16}
			카온	k^+	k^-	493.6	1.24×10^{-8}
				k_S^0	$\overline{k}_S^0$	497.7	0.89×10^{-10}
				k_L^0	$\overline{k}_L^0$	497.7	5.2×10^{-8}
			에타	η^0	자체	548.8	5×10^{-19}
		바리온	양성자	p	$\overline{p}$	938.3	안정
			중성자	n	$\overline{n}$	938.6	900
			람다	λ^0	$\overline{\lambda^0}$	1 115.6	2.6×10^{-10}
			시그마	Σ^+	$\overline{\Sigma}^-$	1 189.4	0.80×10^{-10}
				Σ^0	$\overline{\Sigma}^0$	1 192.5	7×10^{-20}
				Σ^-	$\overline{\Sigma}^+$	1 197.4	1.5×10^{-10}
			크시	Ξ^0	$\overline{\Xi}^0$	1 315	2.9×10^{-10}
				Ξ^-	Ξ^+	1 321	1.64×10^{-10}
			오메가	Ω^-	Ω^+	1 672	0.82×10^{-10}

※ 표에서 어떤 소립자와 질량, 수명, 전기량의 크기는 같은데 전기량의 부호가 다른 립자를 그 소립자의 **반립자**라고 부른다.

쿼크모형

소립자가 물질을 이루는 가장 작은 구성요소로 된다면 지금까지 알려진 모든 소립자들이 다 물질을 이루는 기본소립자로 되는가.

말그대로 소립자는 물질을 이루는 가장 근본적인 립자로서 200여종의 소립자들도 어떤 근본적인 몇가지 립자들로 이루어지지 않았겠는가 하는 생각을 하게 되였다.

그리하여 소립자들의 구조모형이 제기되였으며 그중의 하나가 쿼크모형이다.

이에 의하면 전기량이 $\frac{1}{3}e$ 혹은 $\frac{2}{3}e$ 인 쿼크라는 립자가 6개 있으며 이것들과 그의 반립자들이 결합되여 하드론이라는 소립자들을 구성하며 렙톤은 쿼크와 같은 근본적인 소립자로 된다는것이다.

물질을 구성하는 기본소립자

쿼크	전기량	렙톤	전기량
u쿼크	$+\frac{2}{3}e$	전자(e)	$-e$
c쿼크	$+\frac{2}{3}e$	뮤온(μ)	$-e$
t쿼크	$+\frac{2}{3}e$	타이온(τ)	$-e$
d쿼크	$-\frac{1}{3}e$	전자뉴트리노(ν_e)	0
s쿼크	$-\frac{1}{3}e$	뮤온뉴트리노(ν_μ)	0
b쿼크	$-\frac{1}{3}e$	타이온뉴트리노(ν_τ)	0

우주선과 소립자

우주공간으로부터 언제나 에네르기가 매우 큰 소립자들이 지구에로 날아오고있다.

이것은 우주의 매우 넓은 령역들에 소립자들이 발생되고 그것들이 가속되여 큰 에네르기를 가지고 운동할수 있는 조건들이 있다는것을 의미한다.

우주에서 지구에로 날아오는 소립자들을 **1차우주선**이라고 부르며 1차우주선이 물질의 원자핵과 충돌하여 새로 만들어내는 립자들을 **2차우주선**이라고 부른다.

우주선은 소립자연구에 리용될뿐아니라 우주선관측에 의하여 항성내부를 연구할수도 있다. 항성내부에서 강한 핵폭발에 의해 생긴 뉴트리노를 측정하여 항성내부상태를 알아보는 정보를 얻을수 있다.

쿼크들은 서로 매우 굳게 결합되여있으며 그것들이 자유로운 상태로는 존재하지 않으므로 전기소량의 분수값은 관측할수 없는것이다. 그러나 쿼크의 존재는 실험에 의하여 확인되였다.

그림 6-47. 양성자, 중성자, 메존의 쿼크모형

쿼크리론에 의하여 양성자와 중성자와 같은 바리온은 3개의 쿼크의 결합으로 되며 메존은 쿼크-반쿼크결합으로 된다.

실례로 양성자와 중성자는 각각 uud와 udd로 되여있으며 π^+메존은 $u\bar{d}$로 된다.(그림 6-47)

즉
$$u + u + d \to P$$
$$u + d + d \to n$$
$$u + \bar{d} \to \pi^+$$

원자와 원자핵, 핵자, 쿼크의 크기를 비교하면 그림 6-48과 같다.

[례제] 중성자가 양성자로 넘어갈 때 전자가 생겨나는것을 쿼크리론으로 설명하여라.

풀이. 중성자와 양성자는 각각 3개의 쿼크결합 udd, uud로 이루어져있다.

그러므로 중성자가 양성자로 넘어갈 때에는 하나의 d쿼크가 u쿼크로 되므로 전기량변화는 $+\frac{2}{3}e-(-\frac{1}{3}e)=e$로 된다.

중성자가 양성자로 전환될 때 $+e$의 전기량을 띠므로 전기량보존법칙으로부터 $-e$의 전기량을 가진 전자가 생겨나게 된다.

그림 6-48. 원자와 원자핵, 양성자, 쿼크의 크기비교

문 제

1. 다음의 문장을 완성하여라.

ㄱ) 쿼크에는 □이 $-\frac{1}{3}e$인 □와 □이 □e인 쿼크들이 있으며 이 쿼크들과 그의 □들이 결합되면 강한 □을 하는 립자들인 □을 구성한다.

ㄴ) □은 쿼크들과 □ 근본적인 소립자들이다.

2. 렙톤들을 쿼크들의 결합으로 볼수 있는가? 왜 그런가?
3. 원자핵안에서 중성자는 양성자로 잘 전환되지만 양성자는 중성자로 잘 전환되지 않는다. 왜 그런가?

제 11절. 소립자의 특성

소립자들사이의 호상작용

소립자들은 서로 결합되여 원자핵이나 원자, 분자들을 이루며 서로 충돌하여 다른 립자로 전환되기도 한다.

소립자들사이에 작용하는 힘들을 크게 나누어보면 전자기적호상작용, 강한 호상작용, 약한 호상작용, 중력(만유인력)호상작용의 4가지로 볼수 있다.

소립자들사이에 작용하는 이러한 힘들은 어떤 다른 립자들을 서로 주고받는 과정으로 볼수 있다.

실례로 대전립자들사이의 전자기적호상작용은 한 립자에서 발생한 전자기파가 다른 립자에 작용한 결과라고 볼수도 있고 한 립자에서 발생한 빛량자(소립자의 견지에서 **포톤**이라고도 부른다.)가 다른 립자에 흡수된 결과라고 볼수도 있다. 즉 소립자리론에서는 두 대전립자들사이의 호상작용을 두 립자들에서 발생한 포톤을 호상 주고받는 과정이라고 본다.

일반적으로 호상작용을 전달하는 역할을 하는 립자를 **교환립자**라고 부른다.

전자기적호상작용. 대전립자들사이에 작용하는 힘으로서 그 세기가 강한 호상작용의 1/100배정도이다.

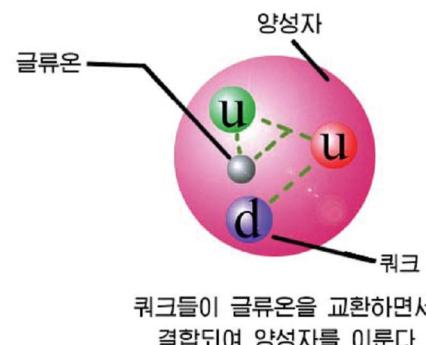
이 힘은 원자안의 핵과 전자를 결합시키는데서 결정적역할을 하는 힘이다.(그림 6-49)

그림 6-49. 원자핵과 전자사이의 전자기적호상작용

강한 호상작용. 하드론들사이에서만 극히 가까운 거리(10^{-15})에서 나타나는 매우 센 힘이다. 이 힘은 핵자들을 결합시키는 핵력의 원천이다. 즉 핵자들사이에 작용하는 핵력은 강한 호상작용이다. 또한 쿼크들은 강한 호상작용에 의하여 하드론을 이루며 이때 교환립자는 **글류온**이다.(그림 6-50)

그림 6-50. 강한 호상작용

약한 호상작용. 렙톤이나 하드론들사이에서 호상작용하는 힘으로서 극히 가까운 거리(10^{-17}m)에서 나타나며 강한 호상작용의 10^{-14}배정도로서 전기힘보다는 매우 작고 중력보다는 대단히 크다. 이 힘은 소립자들이 스스로 붕괴될 때 나타난다.

실례로 β붕괴를 일으키는 힘은 핵자들사이에 작용하는 약한 호상작용의 결과이다. 약한 호상작

용의 교환립자는 W립자이다.(그림 6-51)

중력호상작용. 자연에 존재하는 힘들가운데서 가장 약하며 강한 호상작용의 10^{-38}배밖에 안된다.

중력호상작용의 교환립자를 **중력자(그라비톤)**라고 부르는데 호상작용이 매우 약하므로 실험적으로는 검증하지 못하였다.

자연계에 존재하는 4가지 힘들의 상대세기와 작용거리, 호상작용하는 립자들을 다음 표에 주었다.

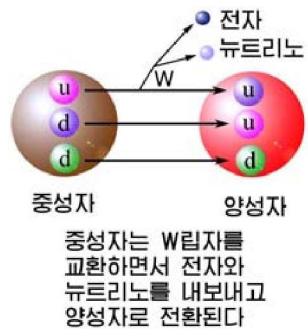



그림 6-51. 약한 호상작용과 β붕괴

힘의 종류	상대세기	작용거리	교환립자	호상작용하는 립자들
강한 호상작용	1	짧은 거리(약 10^{-15}m)	글류온	하드론
전자기적 호상작용	10^{-2}	거꿀두제곱(무한대)	포톤	대전립자
약한 호상작용	10^{-14}	극히 짧은 거리(약 10^{-17}m)	W립자	모든 립자
중력호상작용	10^{-38}	거꿀두제곱(무한대)	중력자	모든 립자

소립자의 특성

소립자들에 대한 연구가 활발해지면서 숨겨져있던 소립자들의 특성이 점차적으로 밝혀지기 시작하였다. 소립자들이 일반적으로 가지는 몇가지 특성을 보자.

우선 소립자들은 자기의 고유한 수명을 가진다. 실례로 중성자는 원자핵밖으로 나가면서 15min의 수명을 가지고 양성자와 전자, 뉴트리노(전자뉴트리노 ν_e)로 붕괴된다.

$$ {}_0^1\mathrm{n} \rightarrow {}_1^1\mathrm{p} + {}_{-1}^{0}e + {}_0^0\nu_e $$

양성자도 핵안에서 중성자와 양전자, 뉴트리노로 전환되는 경우가 있다.

$$ {}_1^1\mathrm{p} \rightarrow {}_0^1\mathrm{n} + {}_{+1}^{0}e + {}_0^0\nu_e $$

《강한 접착제》 글류

쿼크리론에 의하면 쿼크들사이에 강한 호상작용이 있으므로 쿼크들의 호상작용을 전달하는 교환립자들이 있어야 한다. 이 교환립자를 **글류온**이라고 부른다. 글류온이란 쿼크들을 붙여서 하드론을 형성시키는 역할을 한다는 뜻이다. 실례로 두개의 u쿼크와 한개의 d쿼크는 글류온에 의하여 양성자를 이룬다. 또한 하나의 u쿼크와 두개의 d쿼크는 글류온에 의하여 결합되여 중성자를 이룬다. 그러므로 핵자들사이의 교환립자는 π메존이 아니라 쿼크들을 붙이는 《강한 접착제》글류온이다.

다음으로 소립자의 특성은 모든 소립자에 반립자가 있다는것이다. 실례로 1932년에 전자의 반립자인 양전자가 발견되였으며 1955년에 반양성자가 발견되였다. 1960년대에 거의 모든 소립자에 대하여 반립자들이 발견되였으며 1970년대에 반헬리움핵, 1973년에 반초중수소핵이 발견되였다. 그러나 몇개의 소립자들은 반립자를 가지지 않는다.

또한 소립자의 특성은 쌍소멸, 쌍발생이다. 양전자와 전자가 만나면 동시에 소멸되고 γ립자(포톤)를 발생시킨다. 이처럼 반립자로 된 반물질과 립자로 이루어진 물질이 접촉하면 쌍소멸되면서 폭발적으로 막대한 에네르기가 나온다.

소립자의 중요한 특성은 그것들이 호상작용할 때 에네르기, 운동량, 각운동량 등이 보존되며 나아가서 소립자들을 특징짓는 다른 몇가지 고유한 특성량들이 보존된다는것이다. 실례로 소립자들은 서로 전환되거나 쌍발생, 쌍소멸되여도 전체 전기량은 변하지 않는다.

※ 소립자들중에는 기이립자도 있다. 즉 카온(K), 람다(Λ), 시그마(Σ), 크시(Ξ), 오메가(Ω)립자들은 기이하게 행동한다.

실례로 그것들은 언제나 쌍으로만 생겨난다. 즉 $\pi^- + \mathrm{P} \to K^0 + \Lambda^0$의 반응은 존재하지만 $\pi^- + \mathrm{P} \to K^0 + n$의 반응은 일어나지 않는다.

또한 기이립자들은 강하게 호상작용하는 립자들로 붕괴되지만 붕괴될 때에는 강한 호상작용을 하지 않는다. 바리온에 속하는 기이립자들은 질량이 보다 가벼운 바리온으로 붕괴되며 나중에는 양성자와 중성자로 넘어간다.

소립자의 응용

원자핵에서 한개 핵자의 에네르기는 MeV정도이지만 소립자의 에네르기는 GeV정도이다. 즉 소립자에네르기는 핵에네르기의 1 000배정도이다. 소립자에 대하여 깊이 파악하게 되면 핵에네르기보다 1 000배나 큰 새로운 소립자에네르기를 얻을수 있을것이다. 지금 중성자묶음을 리용한 중성자사진법이 개발되여 물질구조연구와 원유탐사에 널리 리용되고있다.

또한 양성자묶음은 물질의 물리화학적성질을 연구하는데서 힘있는 수단으로 쓰이며 특히 상온핵융합반응의 촉매로 쓰이고있다. 뉴트리노묶음은 우주연구에서 기본수단의 하나이며 이온묶음은 핵려파기를 만드는데 쓰이고있다.

이처럼 소립자의 연구는 대단히 넓은 소립자응용분야에서 중요한 의의를 가진다.

[례제] 전자와 양전자가 충돌하면 《소멸》되고 2개의 γ량자가 생긴다. 《소멸》되기 전까지의 립자들의 운동에네르기를 무시할 때 γ량자의 파장을 구하여라.

풀이. 전자와 양전자의 질량은 다같이 0.000 55D이다. 그러므로 전자나 양전자의 운동에네르기를 무시하면 그것들이 가진 에네르기는 아인슈타인의 공식으로부터

$$E=m_e c^2=0.000\ 55\times1.66\times10^{-27}\times(3\times10^8)^2\approx8.21\times10^{-14}(\mathrm{J})$$

한편 전자의 에네르기가 γ량자의 에네르기로 넘어갔으므로 빛량자의 에네르기공식

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

로부터

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6.626\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{8.21\times10^{-14}} \approx 2.4\times10^{-12}(\text{m})$$

답. 약 2.4×10^{-12}m

1. 다음의 문장에서 □안에 알맞는 단어를 써넣어라.
   ㄱ) 모든 □들은 서로 □들을 주고받으면서 □한다.
   ㄴ) 모든 □들은 □, □, □이 같고 □의 부호가 반대인 □를 가진다.
   ㄷ) 양전자와 □가 만나면 동시에 □되고 γ 량자가 발생한다.
2. 쿼크 u와 반쿼크 $\bar{d}$가 결합되여 이루어진 π메존의 전기량은 얼마인가?
3. 양성자의 전기량이 +e이고 중성자는 전기를 띠지 않은 립자라는것을 쿼크리론으로 설명하여라.

문제. 방사성붕괴법칙으로 오랜 력사유적의 형성년대를 어떻게 결정할수 있는가?

방향. · 반감기가 5 720a인 $^{14}_{6}C$는 자연계에 CO_2형태로 존재한다.

· 생물체가 죽으면 CO_2 형태로 들어오던 $^{14}_{6}C$의 공급이 멎고 방사성붕괴만 진행된다.

· $^{14}_{6}C$는 생물체안의 탄소 10^{12}개당 1개정도이며 β립자를 내보낸다.

복습문제

1. 어떤 원소의 원자들은 질량이 서로 다른것이 있다. 이것들은 물리적성질이 서로 다르지만 화학적성질이 같다. 왜 그런가?
2. 자연계에 있는 동은 $^{63}_{29}Cu$와 $^{65}_{29}Cu$의 두가지 동위원소의 화합물인데 그의 원자량은 63.6이다. 동의 동위원소들의 혼합비를 구하여라.

(**답.** 7:3)

3. 질량수가 큰 핵일수록 양성자보다 중성자가 왜 더 많아야 안정한가?

4. 다음 원자핵들의 결합에네르기를 계산하고 어느 핵이 더 안정한 핵인가를 밝혀라.

$$^{7}_{3}\mathrm{Li}, \qquad ^{27}_{13}\mathrm{Al}$$

이 핵들의 질량은 각각 7.014 35Du, 26.974 38D이다.

(답. 39.2MeV, 224.8MeV, $^{27}_{13}\mathrm{Al}$)

5. 온도가 방사성핵의 붕괴속도에 영향을 주는가?

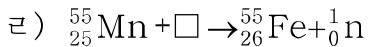
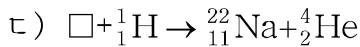
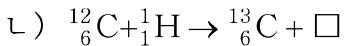
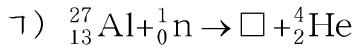
6. 방사성핵 $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$의 반감기는 T=20a이다. 10a, 20a 후에 각각 붕괴되지 않은 핵의 수는 처음핵의 몇%나 되겠는가?

(답. 70.7%, 50%)

7. 어떤 방사성물질의 량이 8h동안에 처음량의 $\frac{1}{3}$로 감소하였다. 24h동안에는 처음량의 몇분의 1로 되겠는가?

(답. $\frac{1}{27}$)

8. 어떤 유적의 한 나무제품에 포함된 $^{14}_{6}\mathrm{C}$의 비률을 재였더니 그것은 살아있는 식물체속에 포함된 $^{14}_{6}\mathrm{C}$의 70.7%였다. 이 나무제품은 언제 만들어졌는가? 여기서 $^{14}_{6}\mathrm{C}$의 반감기는 5.73×10^{3}a이다.

(답. 2 865년 전)

9. 우라니움 $^{235}_{92}\mathrm{U}$는 7번의 α붕괴와 4번의 β붕괴를 거친 다음 어떤 핵으로 되겠는가?

(답. $^{207}_{82}\mathrm{Pb}$)

10. 싸이클로트론속에는 B=1.5T인 고른자기마당이 형성된다. 싸이클로트론전극의 직경이 60cm일 때 α립자, 양성자를 얼마의 에네르기까지 가속시킬수 있는가?

(답. 9.75MeV, 9.69MeV)

11. 다음의 핵반응식을 완성하여라.

ㄱ) $^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{1}_{0}\mathrm{n}\rightarrow\square+^{4}_{2}\mathrm{He}$

ㄴ) $^{12}_{6}\mathrm{C}+^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow^{13}_{6}\mathrm{C}+\square$

ㄷ) $\square+^{1}_{1}\mathrm{H}\rightarrow^{22}_{11}\mathrm{Na}+^{4}_{2}\mathrm{He}$

ㄹ) $^{55}_{25}\mathrm{Mn}+\square\rightarrow^{55}_{26}\mathrm{Fe}+^{1}_{0}\mathrm{n}$

12. 베릴리움 $^{9}_{4}\mathrm{Be}$의 원자핵을 $^{4}_{2}\mathrm{He}$의 원자핵으로 타격하면 탄소원자와 중성자가 생긴다. 핵반응에서 한개의 탄소핵이 생겼을 때 질량결손은 얼마이며 방출되는 에네르기는 몇MeV인가? 여기서 $^{9}_{4}\mathrm{Be}$의 질량은 9.012 2D, $^{4}_{2}\mathrm{He}$의 질량은 4.002 6D이다.

(답. 0.006 13D, 약 5.7MeV)

13. $^{7}_{3}$Li핵에 양성자를 r=10^{-14}m 접근시키려고 한다. 얼마의 에네르기를 소비하여야 하는가?

(답. 0.43MeV)

14. 양성자에 느린 중성자가 부딪치면 $^{1}_{1}H+^{1}_{0}n \rightarrow ^{2}_{1}D+\gamma$와 같이 중수소핵이 얻어지고 γ량자가 나간다. 중성자의 처음운동에네르기를 령으로 보고 γ량자의 에네르기와 파장을 구하여라. 중수소핵의 질량은 2.014 10D이다.

(답. 1.7MeV, 7.23×10^{-13}m)

15. 원자에네르기를 얻기 위하여 $^{235}_{92}U$의 핵분렬을 리용한다. 천연우라니움은 대부분 $^{238}_{92}U$이다. 이것을 농축하여 $^{235}_{92}U$의 포함률을 20%로 하였을 때 농축우라니움 10kg속에 $^{235}_{92}U$가 몇개 들어있는가? 또한 $^{235}_{92}U$가 모두 분렬될 때 나오는 에네르기를 구하여라.

(답. 5.1×10^{24}개, 1.63×10^{14}J)

16. $^{232}_{90}Th$는 좋은 핵연료로 될수 있다. 그것이 핵연료로 되는 과정을 식으로 나타내여라.

17. 태양의 중심부에서는 $4^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He+2e^{+}$식으로 표시되는 핵융합반응이 일어난다.

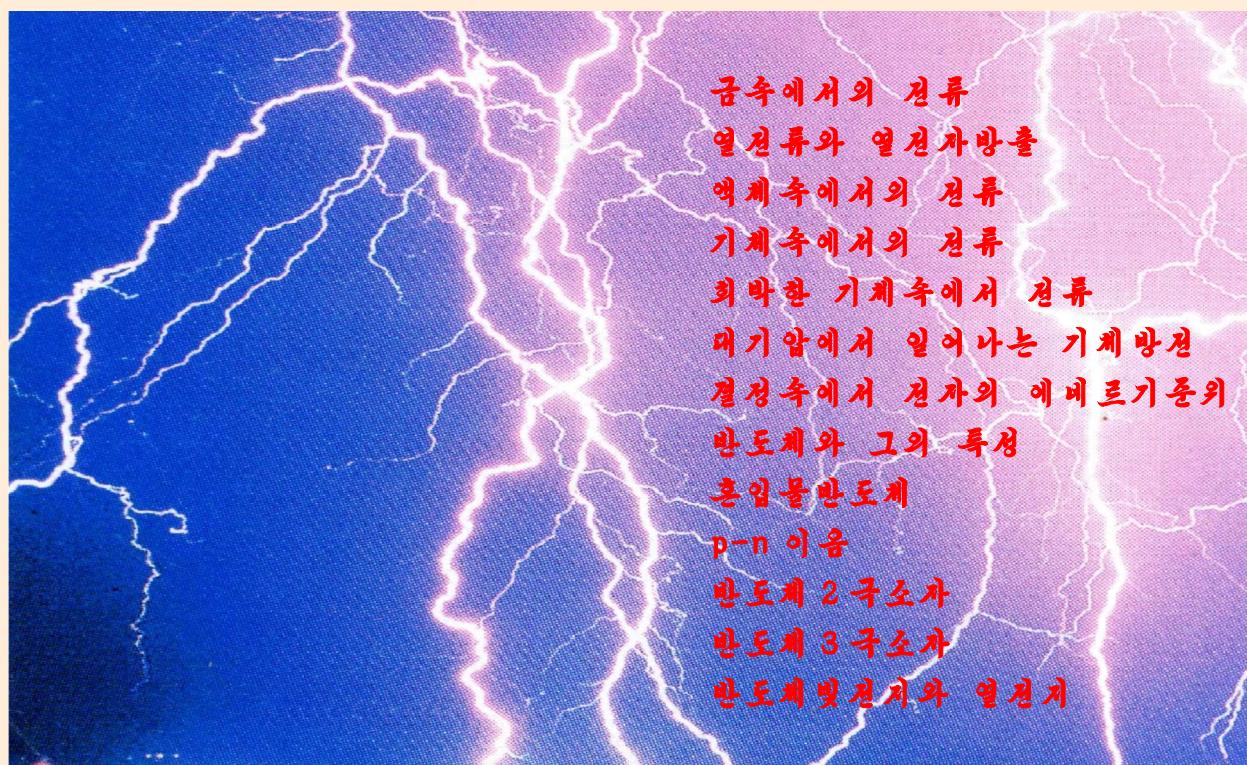
한번의 핵반응에서 방출되는 에네르기는 얼마인가?

(답. 24.7MeV)

18. 바다물 1kg속에 들어있는 중수소를 갈라내여 핵융합반응을 일으키면 평균 2 500kW·h의 에네르기를 얻는다. 바다물 1t에서 얻는 에네르기는 발열량이 3×10^{7}J/kg인 석탄 몇t을 태울 때 얻는 에네르기와 같은가?

(답. 300t)

19. 전자는 왜 자발적으로 다른 립자로 전환되지 않는가?

20. 전자와 양전자가 어떤 거리 r만큼 떨어져있다. 그것들사이의 중력호상작용과 전자기적호상작용의 비를 구하여라.

(답. 2.4×10^{-43})

제7장. 여러가지 매질속에서의 전류

전류는 금속뿐만아니라 소금물이나 가성소다와 같은 액체속으로도 잘 흐르며 비록 약하기는 하지만 규소나 게르마니움과 같은 고체들과 공기와 같은 기체들을 통하여서도 흐른다. 이처럼 전류를 통과시키는 정도에 따라 여러가지 물질들을 도체, 부도체, 반도체로 나눈다.

도체는 금속이나 전해질과 같이 전류를 잘 통과시키는 물질로서 비저항값이 $10^{-4}\Omega\cdot$m보다 작으며 부도체는 유전체나 기체와 같이 보통조건에서는 전류를 거의 통과시키지 않는 물질로서 비저항값이 $10^{6}\Omega\cdot$m보다 큰 물질이다. 반도체는 비저항이 도체와 부도체사이의 값을 가지는 물질이다.

이 장에서는 여러가지 매질에서 전기나르개는 무엇이며 전류의 세기는 어떤 량에 따라 변하는가를 본다. 또한 〈쓸모없다〉고 보던 반도체가 어떤 특성으로 하여 〈귀중한〉 물질로 되였으며 반도체소자는 어떤 방법으로 전자들의 운동을 조종하는가를 배우게 되며 여러가지 형식의 반도체소자들의 구조와 동작원리도 알게 된다.

제 1절. 금속에서의 전류

은, 동, 알루미니움과 같은 금속들은 매우 좋은 전기전도성을 가진다. 그러므로 금속도선들은 전기에네르기를 나르는데 널리 쓰인다. 그 금속도선들의 저항은 매우 작으므로 전기회로에서는 도선의 저항을 무시한다.

금속에서 전기나르개는 무엇이며 왜 금속의 전기저항이 작은가.

금속에서 전기나르개

금속은 원자로 이루어져있고 원자는 핵과 전자(+이온과 자유전자)로 이루어졌다.

전기마당을 걸어주면 어느것이 이동하겠는가.

동과 알루미니움을 맞붙이고 알루미니움의 다른 끝에 또 다른 동을 맞붙인것을 전원에 련결하고 전류를 흐르게 하자.(그림 7-1)

그림 7-1. 금속에서 전기나르개의 실험

1년동안 3.5×10^{6}C의 전기량을 흘려보내고 세 토막을 떼여보았는데 동속에 알루미니움원자가 들어있는것도 없었고 알루미니움속에 동원자가 들어있는것도 없었다.

이 실험은 금속에서의 전기나르개는 양이온이 아니라는것을 확증하였다.

그후 1912년에 금속에서 전류는 전자들의 이동에 의한것이라는것을 다른 실험으로 증명하였다.

금속도선을 감은 직경이 큰 선륜을 빠른 속도로 회전시키다가 급제동시켰다.(그림 7-2)

그림 7-2. 선륜에서 자유전자에 대한 실험

선륜이 급제동될 때 도선의 끝에 련결된 검류계에는 짧은 시간동안 전류가 흘렀다.

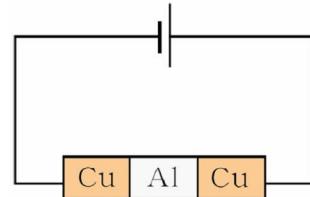
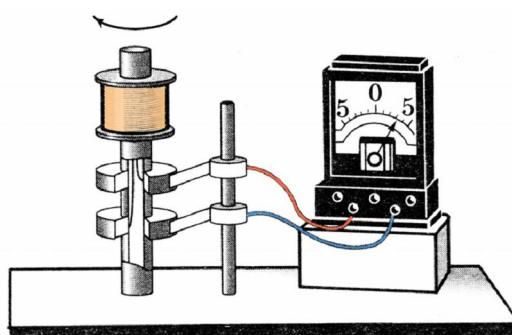
이 전류의 방향을 따져보면 전기나르개는 −부호로 대전된 립자들이라는것을 보여주었다.

회로에 전류가 흐르는 시간동안에 지나간 전기량을 측정하여 비전기량 q/m를 재였더니 그것은 다른 방법으로 측정한 전자의 비전기량(e/m)의 값과 일치한다.

이것은 선륜이 급제동될 때 도선속에서 자유전자들이 관성에 의하여 얼마간 운동을 계속하기때문에 생긴 현상이라는것을 보여주었다.

이처럼 금속에서 전기나르개는 자유전자라는것을 실험적으로 확증하였다.

전자운동론에 의한 전기전도성의 설명

금속의 구조는 어떤 특징이 있는가.

원자들이 모여 금속을 이룰 때 매개 원자에서 맨바깥전자층에 약하게 속박되여 있는 한두개의 전자들이 원자에서 떨어진다.(그림 7-3)

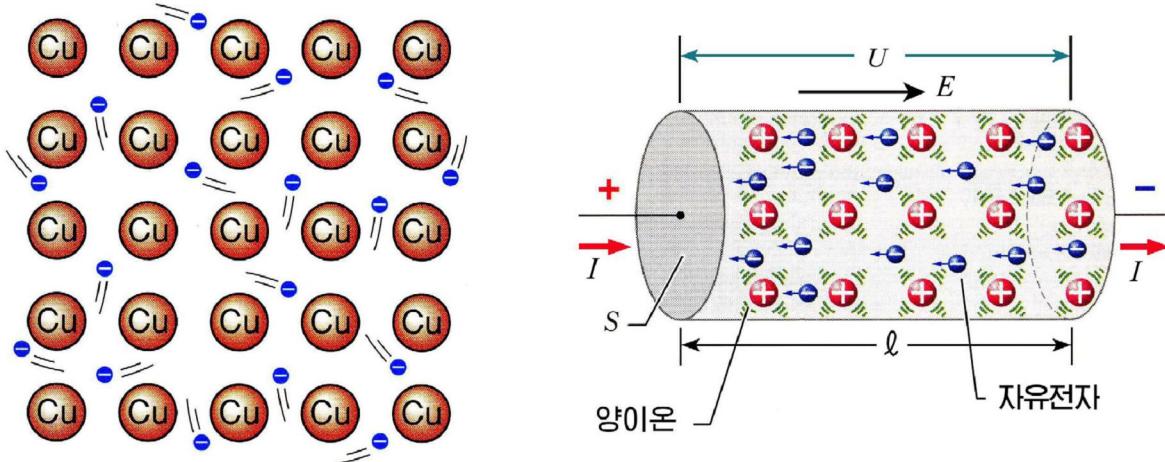



그림 7-3. 금속안에서 전자의 운동

전자를 내준 양이온들은 결정구조를 이루고있으며 떨어진 자유전자들은 양이온들사이로 무질서하게 운동하면서 모든 이온들에 공동으로 속하게 된다.

양이온들은 이 자유전자들을 매개로 하여 조밀한 구조를 이루는데 많은 전자들이 양이온들의 마당을 가리우고있으므로 금속안에서 전기마당은 평균적으로 령이다.

이처럼 원자에서 떨어져나온 자유전자들이 전기전도를 이룬다는 의미에서 그것을 **전도전자**라고 부른다.

전도전자들이 무질서하게 이동하면서 금속밖으로 나가려고 할 때 양이온들이 전자들을 금속안으로 끌어당긴다. 이처럼 금속안의 전도전자들은 마치 그릇속에서 무질서하게 운동하는 리상기체분자와 비슷하며 금속겉면이 그릇벽의 역할을 하는것으로 생각할수 있다. 이로부터 금속안의 전도전자들의 모임을 **전자기체**라고도 부른다.

외부전기마당이 없을 때 전도전자들은 무질서한 열운동을 하면서 양이온과 호상작용을 하지만 전자의 에네르기는 변화되지 않는다.

금속에 전기마당을 걸어주면 전도전자들의 운동이 어떻게 달라지는가.

금속도체에 전기마당이 걸리면 무질서하게 운동하던 전자들에 전기힘이 작용하여 전자들은 전기마당과 반대방향으로 가속되면서 질서있게 운동하게 된다. 이때 전자들은 살창진동을 하는 양이온과 부단히 호상작용하면서 운동하므로 속도가 무한히 커지지 못한다. 때문에 전자들의 질서있는 운동에는 어떤 평균속도가 있으며 따라서 일정한 정상전류가 흐르게 된다.

전자들의 질서있는 운동으로부터 옴의 법칙을 유도하여보자.

금속에서 전류의 세기는 자름면 S를 단위시간동안에 지나가는 전기량으로 표시할수 있다.

$$I=\frac{q}{t}=\frac{eN}{t}=\frac{enS\ell}{t}=enS\bar{v} \tag{1}$$

여기서 n은 금속의 단위체적속에 있는 전도전자의 수(전도전자수밀도)이고 S는 도선의 자름면적, ℓ은 t시간동안에 전도전자가 이동한 거리이며 $\bar{v}$는 전자의 평균속도이다.(그림 7-4)

그림 7-4. 금속안의 전류

전자의 질서있는 운동의 평균속도를 구하자.

전도전자들은 원자와 작용할 때 속도가 령인 상태로부터 다음 작용할 때까지 t시간동안 가속된다.

$$v = at = \frac{F_{전}}{m}t = \frac{eE}{m}t$$

여기서 E는 전기마당의 세기이므로 $E=\frac{U}{\ell}$로 쓰면 전도전자의 평균속도는 다음과 같다.

$$\bar{v} = \frac{(0+v)}{2} = \frac{eE}{2m}t = \frac{etU}{2m\ell} \qquad (2)$$

식 2를 식 1에 넣고 전류의 세기와 전압사이관계를 구하자.

$$I = enS\frac{etU}{2m\ell} = \frac{e^2nt}{2m}\frac{S}{\ell}U$$

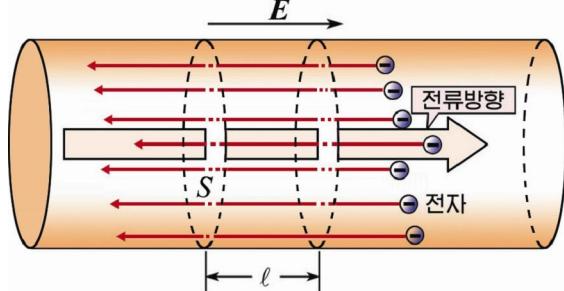
여기서 금속의 구조와 전도전자의 운동특성에만 관계되는 량 $\frac{2m}{e^2nt}$을 ρ(비저항)라고 표시하면 옴의 법칙을 얻는다.

$$I = \frac{S}{\rho\ell}U = \frac{U}{R}$$

비저항과 전자의 가속시간

도체의 전기적성질을 표시할 때는 전자의 전기량 e와 질량 m과 같은 물리상수외에도 물질의 종류에 따르는 량인 전자수밀도 n과 전자의 가속시간 t에 관계되는 금속의 비저항 $\rho=\frac{2m}{e^2nt}$과 같은 량도 쓴다.

여기에서 n값을 알수 있으므로 비저항 ρ를 측정하여 t를 평가할수 있다.

계산에 의하면 금속안에서 전자의 가속시간은 10^{-14}s정도이며 이 시간에 전자는 10^{-9}m의 거리를 지나간다. 즉 전자는 금속살창의 열개 원자당 한번씩 호상작용한다. 이때문에 금속의 전기전도성은 매우 크다.

문 제

1. 동선안에서 자유전자가 한번 충돌하고 다음번 충돌할 때까지 평균시간을 구하여라. 동원자 1개에서 자유전자가 하나씩 생겼다고 본다. 전자는 단위시간동안에 양이온과 몇번 작용하는가? 동의 비저항은 $1.72\times10^{-8}\Omega\cdot m$, 밀도는 $8.9\times10^{3}kg/m^{3}$, 몰질량은 64g/mol이다.
2. 방안온도에서 금속안의 전자의 평균열운동속도를 계산하고 전기마당의 세기가 100V/m일 때 전자의 질서있는 운동속도 0.44m/s와 비교하여라.
3. 금속에서의 전류에 대하여 다음과 같이 말할수 있는가?
   ㄱ) 금속에서의 전류는 자유전자와 양이온들의 이동으로 이루어진다.
   ㄴ) 금속도체속의 자유전자들은 전기마당이 걸리면 그와 반대방향으로 질서있게 이동한다.
   ㄷ) 금속을 가열하면 자유전자들의 열운동이 활발해지므로 센 전류가 흐른다.
   ㄹ) 금속안의 모든 전자는 외부전기마당이 걸리면 전류를 이룬다.

제 2 절. 열전류와 열전자방출

철이나 니크롬과 같은 금속도선에 전류가 흐르면 열이 발생한다.

반대로 금속에 열을 가하면 전류가 흐르겠는가.

열전류

금속막대기의 한끝을 가열하고 다른 끝을 차게 하면서 두끝에 μA전류계를 련결하면 바늘이 약간 움직인다.

이것은 비록 작지만 전류가 흐른다는것을 보여준다.

이처럼 금속에 온도차가 생기였을 때 발생하는 전류를 **열전류**라고 부른다.

열전류는 온도차가 클수록 크다.

❓ 전기마당을 주지 않은 금속에서 어떻게 전류가 흐르겠는가.

금속을 가열하면 원자들에 속박되여있던 일부 전자들이 전도전자로 된다.

따라서 금속의 온도가 높은 곳의 전도전자수밀도는 온도가 낮은 곳보다 커지며 확산에 의하여 전자들이 이동한다.

따라서 금속의 두끝은 서로 다른 부호를 띠게 되여 전류가 흐른다.

열전류의 크기는 금속의 종류에 따라 서로 다르게 나타난다.

그것은 금속의 구조와 에네르기준위가 다르기때문이다.

❓ 서로 다른 금속을 접촉시켰을 때에도 열전류가 흐르겠는가.

강철선과 콘스탄탄선(동과 니켈의 합금선)으로 알아보자.

○ 그림 7-5와 같이 강철선과 콘스탄탄선의 두끝을 잘 련결하고 전류계를 직렬로 이어 닫긴회로를 만들고 온도가 같을 때 전류가 흐르지 않는가를 알아본다. 전류가 흐르지 않는다.

○ 한 이음점을 가열하고 다른 이음점을 랭각시키면서 전류계의 바늘을 살펴본다. 바늘이 움직인다.

○ 두 이음점의 온도차를 크게 하면서 전류의 세기를 잰다. 온도차가 크면 전류의 세기가 커진다.

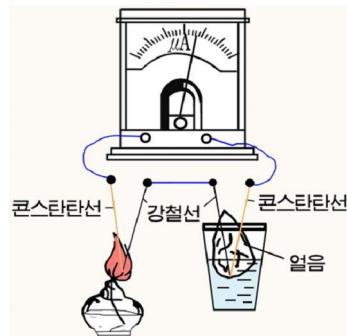



그림 7-5. 종류가 다른 두 금속에서 전류가 흐른다

생각하기 금속쌍에서의 전류와 금속막대기의 열전류의 차이점은 무엇인가?

종류가 다른 두 금속에서 생기는 전류는 하나의 금속에서 발생한 열전류에 비하여 훨씬 크므로 확산현상으로 설명되지 않으며 그 어떤 다른 작용으로 보아야 한다.

종류가 서로 다른 두 금속선의 두 이음점에 온도차를 만들었을 때 전기마당을 형성하는 전동력을 **열전동력**이라고 부른다.

철-콘스탄탄선의 이음점들의 온도차가 수백℃이면 수 mV의 열전동력이 얻어진다.

열전동력은 어떻게 생기는가.

종류가 다른 두 금속 A와 B를 련결하여 닫긴회로를 만들면 이음점에서 전도전자들의 이행이 생긴다.(그림 7-6)

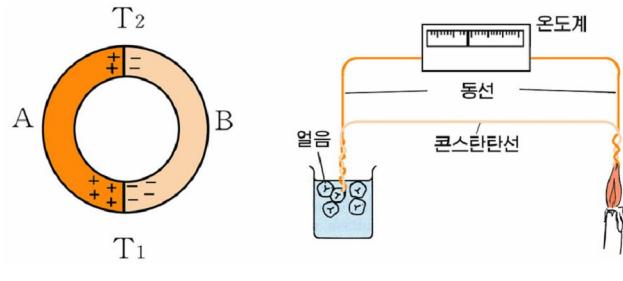
그것은 금속의 종류가 다르면 금속안의 전도전자수밀도가 다르고 방출일의 크기가 차이나기때문이다.

금속 A의 전도전자수밀도가 금속 B보다 크고 방출일이 작으면 A에서 B에로 이동하는 전자의 수가 반대로 이동하는 전자의 수보다 많다. 이때 전자를 넘겨준 A는 +전기를, 전자를 넘겨받은 B는 −전기를 띤다.

그림 7-6. 열전동력이 생기는 리치와 열전대

이리하여 두 금속의 이음점에 전위차가 생기는데 같은 조건에서 두 점의 전위차는 크기가 같으므로 전류가 흐르지 않는다.

한 이음점의 온도가 높으면 그곳에서 전자들의 이동이 더 잘 일어나므로 전위차도 커진다. 이리하여 이음점의 온도가 다르면 전체 회로에 열전류를 흐르게 하는 열전동력이 생긴다.

열전동력의 크기는 두 이음점의 온도차(T_1-T_2)에 비례한다.

열전동력은 금속의 구조와 전자수밀도에 관계되므로 금속쌍을 어떻게 선정하는가에 따라 다르다. 열전류가 흐르는 금속의 순서는 다음과 같다.

니크롬, Fe, Mo, Cd, Cu, Au, Ag, Zn, Mn, Pb, Al, Pt, Na, Pd, K, Ni, 콘스탄탄, Bi

금속쌍을 선정하였을 때 우의 순서에서 앞에 있는 금속으로부터 뒤에 있는 금속쪽으로 열전류가 흐른다.

열 전 대

금속쌍에서 열전동력이 생기는 현상을 어디에 리용할수 있는가.

실험에 의하면 금속쌍에서 생기는 열전동력의 크기는 넓은 온도구간에서 두 이음점의 온도차에 비례한다.

$$\xi = \alpha(T_1 - T_2)$$

여기서 α는 금속의 종류에 관계되는 값이다.

이로부터 한 이음점의 온도를 일정하게 유지하면서 열전동력값을 재면 다른 이음점의 온도를 잴수 있다.

금속쌍의 열전동력을 측정하여 온도를 재는 기구를 **열전대**라고 부른다.

열전대는 금속으로 만들었으므로 액체온도계로 잴수 없는 높은 온도를 잴수 있다.

열전대의 한 이음점을 일정한 온도 T_2로 유지하면서 다른 이음점을 재려는 금속용융물(T_1)속에 넣고 열전동력(열전류)을 측정하면 온도차를 알수 있다.

금속쌍이 녹지 않는 온도한계내에서 직선성이 좋은 구간에서 동작하는 열전대를 선정하여 사용하여야 한다.

열전대금속쌍의 사용온도구간은 다음표와 같다.

열전대금속쌍의 사용온도구간

열전대금속쌍의 이름	사용온도구간 [℃]	열전대금속쌍의 이름	사용온도구간 [℃]
동-콘스탄탄선	-200～300	크로멜-알루멜	-200～1 200
철-콘스탄탄선	-200～750	백금-백금로디움	0~1 450

열전대를 리용하면 전기로에서와 같은 높은 온도를 측정하여 원격조종, 자동조종할수 있으므로 고열로동을 없앨수 있다.

열전자방출

금속안의 전자들은 빛량자의 큰 에네르기를 받으면 금속밖으로 튀여나가는것처럼 열에네르기를 받아도 튀여나갈수 있지 않는가.

전도전자들은 금속안에서는 기체분자들처럼 자유롭게 운동하지만 금속밖으로 쉽게 나가지 못한다. 이것은 금속겉면에 에네르기장벽이 있기때문이다.

에디슨은 1883년에 전등을 가지고 다음과 같은 실험을 진행하였다.(그림 7-7)

그림 7-7. 열전자 방출에 대한 실험

공기를 뽑은 유리관속에 가열선조와 함께 전극판을 설치하고 가열선조와 전극판사이에 전압을 걸어주었다. 가열선조가 가열되기 전에는 전류가 흐르지 않지만 가열선조를 가열하고 전극판에 +극을 걸어주면 전류가 흐르고 −극을 걸어주면 전류가 흐르지 않는다.

이 현상은 그때로부터 10년이 지나 전자가 발견된 다음에야 해명되였으며 그에 의하여 전자관이 발명되였다.

금속을 가열할 때 전자가 에네르기를 받아 금속밖으로 튀여나오는 현상을 **열전자방출**이라고 부르며 이때 튀여나온 전자를 **열전자**라고 부른다.

가열된 금속으로부터 전자들이 어떻게 금속밖으로 방출되겠는가.

전도전자들이 금속밖으로 튀여나오려면 금속내부에 전자들을 얽매여두는 힘을 극복하기 위한 일(방출일)을 받아야 한다.

금속의 방출일은 수eV인데 금속의 종류에 따라 다르다.

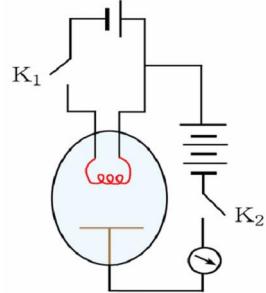
생각하기 전도전자들이 열운동을 한다고 보면 그것의 온도는 수백K이겠는가, 수천K이겠는가?

열전자방출현상은 전자공학에서 많이 리용된다.

TV수상관이나 형광등에서는 가열선조에 전류가 흐를 때 열전자들이 가열선조밖으로 튀여나오는 현상을 리용한다.

보통금속들은 방출일이 크므로 전자가 쉽게 튀여나가도록 하기 위하여 방출일이 작은 산화물을 가열선조걸면에 발라준다.

문 제

1. 열전대에서 열전동력의 크기가 금속쌍의 두 이음점의 온도차에 비례하는 원인을 설명하여라.
2. 월프람의 방출일은 4.5eV이다. 전도전자가 월프람으로부터 튀여나오려면 최소온도는 얼마인가?
3. 백금의 방출일은 5.3eV이다. 전도전자가 백금으로부터 튀여나오려면 전자의 속도가 적어도 얼마여야 하겠는가?
4. 산화바리움막을 씌운 TV수상관의 전자총에서 전자가 떨어져나오려면 그의 속도가 적어도 6.2×10^5m/s보다 작지 말아야 한다. 산화바리움의 방출일은 얼마인가?

제 3 절. 액체속에서의 전류

액체는 쉽게 흐르는 물질이므로 액체알갱이들은 잘 이동한다. 따라서 액체는 전류를 금속보다 잘 통과시키지 않겠는가.

전해질속에서의 전기나르개

먼저 물이 전류를 통과시키겠는가를 조사하여보자.

보통 물속에는 여러가지 불순물이 들어가있으므로 순수한 물인 증류수로 실험하여보자.

○ 빈 유리그릇속에 두 금속판을 넣고 전지를 거쳐 작은 전등을 직렬로 련결하고 전등이 켜지는가를 본다. 켜지지 않는다.

○ 그릇에 증류수를 채워넣어보자. 불이 켜지지 않는다.

○ 짙은 소금물을 방울방울 떨구어넣으면서 전등에 불이 켜지는가를 살피자. 소금물을 적당히 넣으면 전등의 가열선조가 빨갛게 보이고 소금물을 더 많이 넣으면 더 밝아진다.

같은 실험기구에 소금용액대신 류산동용액을 넣어보아도 전류가 흐른다.(그림 7-8)

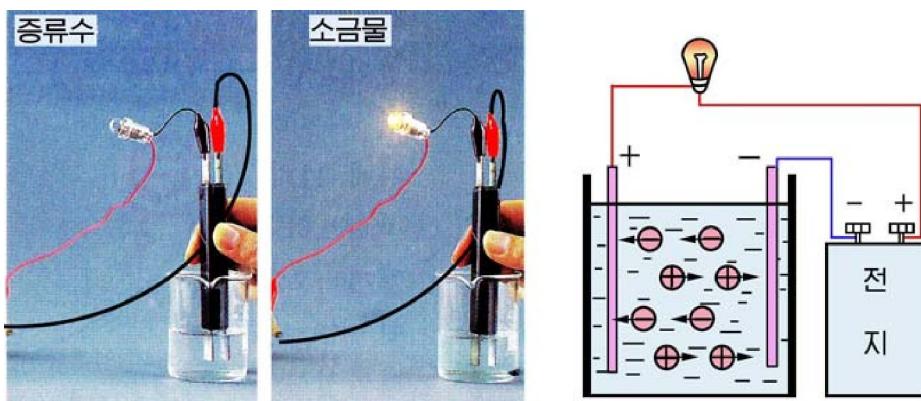



그림 7-8. 소금물이나 류산동용액에서는 전류가 흐른다

소금이나 류산동이 전류를 어떻게 흘려보내는가.

같은 그릇에 마른 소금을 넣고 그속에 전극을 넣어도 전등에 불이 켜지지 않는다.

실험에서 알수 있는것처럼 증류수와 마른 소금은 전류를 흘려보내지 않지만 물에 소금을 푼 용액은 전류를 잘 흘려보내는 좋은 도체로 된다.

용액속에서 무엇이 전기나르개로 되는가.

증류수나 마른 소금이 전류를 흘려보내지 않는것은 그속에 전기나르개가 없다는 것을 의미한다.

전기나르개는 물속에 풀려있는 소금이나 산, 알카리립자들에 의하여 만들어진다.

물분자들은 H^{+}-$(OH)^{-}$로 극성을 띠고있다.

소금이나 산, 알카리립자들은 극성립자들이므로 이 립자의 두 극에는 물분자의 반대극성이 놓인다.

용액에서 립자의 무질서한 열운동과정에 소금이나 산, 알카리립자들은 ＋이온과 －이온으로 갈라진다.(그림 7-9)

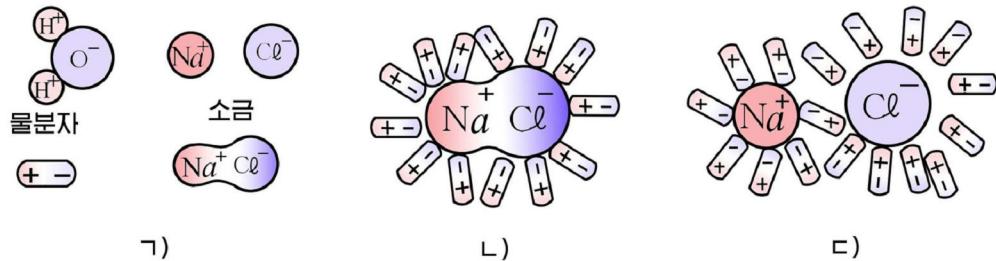
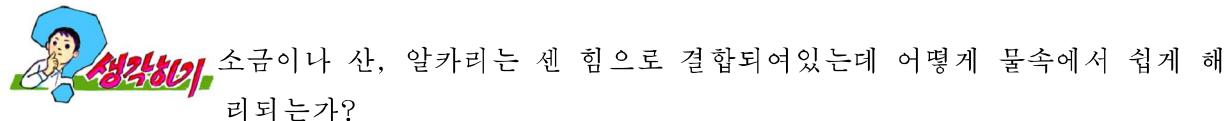



그림 7-9. 소금의 해리과정

이처럼 용질이 용매에서 이온들로 갈라지는 현상을 **해리**라고 부르며 이온이 풀려있는 용액을 **전해질용액**이라고 부른다.

전해질용액에 전기마당을 걸어주면 양이온은 음극으로, 음이온은 양극으로 이동하면서 전류가 흐른다.

전해질용액에서 전기나르개는 ＋이온과 －이온이다.

이것은 전해질속의 두 전극에 서로 다른 물질이 쌓이는것을 보고도 알수 있다.

소금이나 산, 알카리는 센 힘으로 결합되여있는데 어떻게 물속에서 쉽게 해리되는가?

전해질속에서 전류의 세기

전해질의 농도를 일정하게 유지하면서 온도를 높일 때 전류의 세기가 어떻게 변하겠는가.

온도가 높아지면 용액립자들의 무질서한 열운동이 세지면서 이온들의 이동을 방해하는 작용 즉 저항이 커질수 있다.

그러나 실험에 의하면 용액의 온도가 높아질 때 전류의 세기는 커진다.

이것은 온도가 높아지면 열운동이 활발해지면서 용질립자들이 더 쉽게 분해되여 이온이 많아지기때문이다.

해리된 이온들은 무질서한 운동과정에 다시 만나 재결합되기도 한다. 보통상태에서 해리과정과 재결합과정은 평형을 이루며 이온들의 농도가 일정하게 유지된다.

용액이 도체이면 여기서도 옴의 법칙이 성립하겠는가.

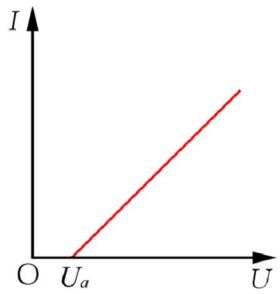
이것을 금속도선에서처럼 전압을 변화시키면서 용액으로 흐르는 전류의 세기를 재여 알아볼수 있다.

용액의 온도를 일정하게 유지할 때 전압과 전류의 세기사이의 관계를 표시하는 그라프는 금속도선에서처럼 직선이다.(그림 7-10)

그림 7-10. 용액의 U-I특성곡선

그런데 이 직선은 자리표의 원점을 지나지 않으며 오른쪽으로 《옮겨가》있다. 이것은 용액에 잠긴 전극들의 걸면에서 일어나는 분극현상때문이다.

전극과 용액의 접촉부분에서 생기는 전동력은 전극에 의한 전기마당과 반대부호를 가진다.

또한 전해질속에서 중성인 용질립자들이 이온으로 갈라져 전류를 이룰 때 이온들은 전자에 비하여 질량과 체적이 매우 크므로 이동하면서 용액의 다른 분자들과 자주 충돌하여 열이 발생하며 용액의 온도가 쉽게 올라간다. 이에 따라 전류의 세기는 커지여 전해질속에서는 옴의 법칙이 정확히 성립하지 않는다.

전기분해

전해질속에서 전류가 흐를 때 중성인 립자들이 이온으로 갈라져 이동하므로 물질의 수송이 일어나 전극에는 어떤 물질이 생기게 된다.

전극에 생기는 물질의 량은 무엇에 관계되겠는가.

생겨난 물질의 질량은 전극에 쌓인 이온들의 질량의 합과 같다.

이온의 질량은 $m_{이}$, 전기량을 $q_{이}$라고 하고 Δt시간사이에 전극에 쌓인 이온의 수를 $N_{이}$라고 표시하면 전극에 생겨난 물질의 량은 다음과 같다.

$$m = m_{이} N_{이} \qquad (1)$$

전해질속으로 흐르는 전류의 세기가 I일 때 Δt시간동안에 전극에 도달한 이온의 수 $N_{이}$는 이온들이 가져간 전기량 Δq로 표시할수 있다.

$$N_{이} = \frac{\Delta q}{q_{이}} = \frac{I\Delta t}{q_{이}} \qquad (2)$$

이온의 전기량은 $q_{이} = ne$이며 이온의 질량은 $m_{이} = \frac{\mu}{N_A}$이다.

식 2를 식 1에 넣고 어느 한 전극에 생긴 물질의 량을 표시하면 다음과 같다.

$$m = \frac{\mu}{neN_A} I\Delta t \qquad (3)$$

여기서 전해질의 종류에만 관계되는 량 $\frac{\mu}{neN_A}$를 비례결수 k로 놓으면 식 3은 간단하게 표시된다.

$$m=kI\triangle t$$

전해질속으로 전류가 흐를 때 매 전극에 생기는 물질의 질량은 전해질을 통하여 흐른 전류의 세기와 시간에 비례한다. 이것은 1836년에 파라데이가 실험적으로 발견하였으므로 **파라데이의 전기분해법칙**이라고 부른다.

전해질속에서 전류에 대한 연구는 물리학과 화학, 기술공학에서 중요한 기초원리로 된다. 전해질속에서 전류가 흐를 때 전극에 물질이 쌓이는 현상은 전기도금과 전기분해에 널리 리용된다.

전기도금은 금속제품을 산화작용이나 다른 물질의 력학적 및 화학적작용으로부터 막기 위하여 니켈이나 크롬, 금이나 은의 얇은 층을 덧씌우는것이다.

또한 전기분해를 리용하면 광석으로부터 필요한 금속을 얻어낼수 있으며 불순물을 제거하고 금속의 순도를 훨씬 높일수 있다.

파라데이의 전기분해법칙으로부터 전기소량을 어떻게 구할수 있는가?

문 제

1. 금속에서 전기나르개와 액체의 전기나르개는 어떻게 다른가?
2. 액체속에서의 전류는 용질의 농도와 온도에 관계된다. 왜 그런가?
3. 전해질에 흐르는 전류에 대한 옴의 법칙과 금속도체에서의 옴의 법칙은 어떤 차이가 있는가?

제 4 절. 기체속에서의 전류

우리 주위에 있는 공기는 절연체이다. 공기가 절연체가 아니라면 수많은 전기줄이 늘여져있는 속에서 사람이 어떻게 살수 있겠는가.

그러면 공기와 같은 기체들은 항상 절연체이겠는가.

기체의 이온화

보통상태에서 모든 기체는 전류를 흘려보내지 않는다.

그러면 공기가 어떤 경우에 전류를 흘려보내는가.(그림 7-11)

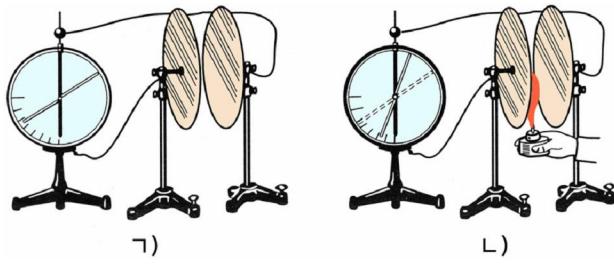



그림 7-11. 기체의 이온화

◯ 두 금속판을 서로 다른 부호로 대전시키고 거기에 검전기를 련결하자. 검전기의 바늘은 벌어져있으며 그 각도가 변하지 않는다.

◯ 극판사이에 알콜등을 놓고 공기를 가열하자. 검전기의 바늘이 벌어진 각이 급격히 작아진다.

◯ 극판사이에 자외선이나 렌트겐선을 쪼여주자. 같은 효과가 생긴다.

실험으로부터 보통상태에서 공기에는 대전립자가 없어서 전류가 흐르지 않지만 가열하거나 강한 빛을 작용시키면 두 극판사이로 전기량이 이동한다는것을 알수 있다.

실험은 불길의 작용으로 극판사이에 있는 공기속에 대전립자가 나타났다는것을 보여준다.

구체적으로 조사한데 의하면 기체속에서 전기나르개는 이온과 전자들이다.

이 대립전자들이 어디서 생겨났겠는가.

공기를 가열할 때 분자들은 매우 빨리 운동하기 시작한다. 이때 어떤 분자들은 다른 분자와 충돌하면서 양이온과 전자로 갈라진다. 이때 전자가 중성분자에 붙어 이온이 생길수도 있다.

기체에서 이온이 생기는 과정을 기체의 **이온화**라고 부른다.

온도가 높을수록 더 많은 공기분자들이 이온으로 된다.(그림 7-12)

그림 7-12. 공기의 이온화

기체분자들은 자외선이나 렌트겐선을 쪼여줄 때에도 빛량자들의 작용에 의하여 이온화된다.

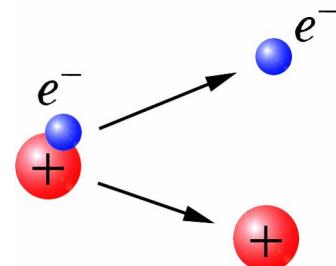
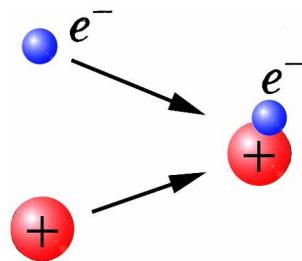
이처럼 이온화된 기체속에는 세 종류의 전기나르개(전자, ＋이온, －이온)들이 있다.

무질서한 운동과정에 전자와 ＋이온이 결합되여 다시 중성분자로 되는 현상도 있다.(그림 7-13)

그림 7-13. 기체속에서 재결합

기체가 외부작용을 받아 이온화되면 전자와 이온의 이동으로 전류가 흐른다. 기체를 통하여 전류가 흐르는 현상을 **기체방전**이라고 부른다.

기체속에서 전기전도는 용액속에서의 전기전도와 비슷하다.

기체속에서의 전류는 음극으로 향하는 양이온들의 이동과 양극으로 향하는 음이온들과 전자들의 이동으로 이루어진다.

이 흐름들은 전극에 도달하여 물질로 쌓여있는것이 아니라 전극으로부터 전기량을 주고받아 중성분자로 되여 기체로 되돌아온다.

종속방전과 독립방전

기체방전에서 전압과 전류는 어떤 관계가 있는가.

이것을 기체방전관에서 실험으로 조사할수 있다.

○ 기체가 들어있는 유리관속에 두개의 금속전극을 넣고 외부이온화작용을 일정하게 유지하고 전압을 변화시키면서 전류의 세기를 측정하자.(그림 7-14) 전기마당이 없을 때($U=0$) 회로에 련결한 전류계는 령을 가리킨다.($I=0$)

○ 전압을 높이면 전류의 세기가 증가하다가 어떤 전압에 도달하면 전류의 세기는 더는 커지지 않는다.

○ 전압을 계속 높이면 전류의 세기가 급격히 커진다.

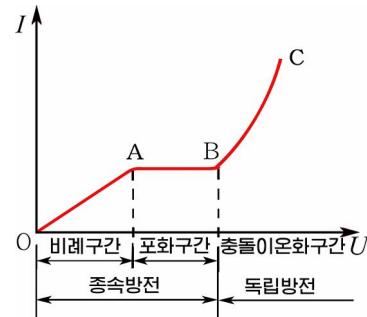
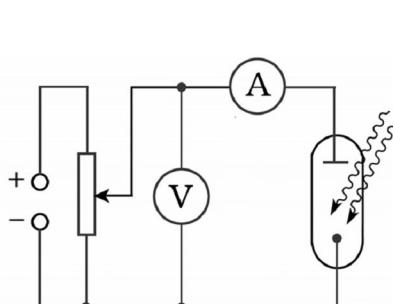



그림 7-14. 기체방전에서 U-I특성실험

기체방전에서 U-I특성을 그라프로 표시하면 서로 다른 세 구간으로 갈라볼수 있다.

전압을 령으로부터 점차 높이면 이온화된 전기나르개들이 극판으로 끌려가는 개수가 점차 많아지면서 전류가 커진다.(비례구간)

어떤 전압에 이르면 이온화되는 전기나르개들이 전부 끌려가게 되며 전류의 세기는 그 이상 더 커지지 못하고 포화된다.(포화구간)

이때까지의 기체방전은 외부작용에 의한 이온화현상에 기초하였으므로 외부작용을 없애면 방전이 멎는다. 그러므로 이 방전을 **종속방전**이라고 부른다.

전압을 더 높이면 전류의 세기가 급격히 커진다.(충돌이온화구간)

전압을 더 높였을 때 전류의 세기가 왜 갑자기 커지며 이 구간을 왜 충돌이온화구간이라고 하는가.

전류의 세기가 갑자기 커지는것은 어떤 요인으로 기체의 중성분자들로부터 이온이 빨리 늘어난다는것이다. 이때에는 외부에서 이온화작용을 없애도 방전은 계속된다. 따라서 이것을 **독립방전**이라고 부른다.

높은 전압에서 독립방전이 일어날 때 전자는 중성분자와 충돌하고 다음번 충돌할 때까지 가속되는데 이때 얻는 운동에네르기가 분자를 이온화하는데 필요한 에네르기(이온화에네르기)보다 커진다. 그러므로 충돌에 의한 이온화가 일어난다.

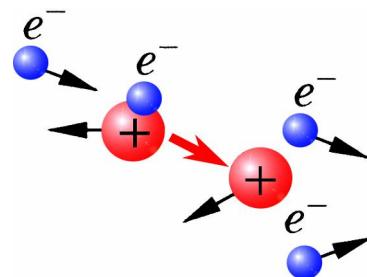



그림 7-15. 충돌에 의한 이온화과정

이때 전자가 중성분자와 한번 충돌하면 전자가 2개로 늘어나고 이것들이 다른 중성분자들과 충돌하면 전자는 4개로 늘어난다.(그림 7-15) 이 과정에 전자들이 사태처럼 급격히 늘어나므로 이런 현상을 **전자사태**라고 부른다.

외부이온화작용을 없애도 어떻게 방전이 계속되는가.

가속된 양이온이 음극에 충돌하면 그로부터 전자가 방출되며 이 전자들이 가속되면서 전자사태를 일으키는 씨로 되여 방전은 멎지 않고 계속된다.

전자들이 한번 충돌하고 다음 충돌할 때까지 전기마당으로부터 받는 일은 가속되는 거리가 l일 때 eEl이며 이것은 전자의 운동에네르기 $mv^2/2$으로 넘어간다.

만일 전자의 운동에네르기가 중성분자를 이온화시키는데 필요한 이온화에네르기보다 크면 이온화가 일어난다.

$$\frac{mv^2}{2} > A_{\text{이온화}}$$

문 제

1. 기체속으로 흐르는 전류는 전해질속으로 흐르는 전류와 무엇이 다른가?
2. 기체속으로 흐르는 전류는 금속에서의 전류와 무엇이 같은가?
3. 종속방전과 독립방전에서 전자의 운동은 어떤 차이가 있는가?

제 5 절. 희박한 기체속에서 전류

금속도체속으로 전류가 흐르면 열이 나고 액체속으로 전류가 흐르면 열이 나면서도 물질을 분해하는 작용을 한다.

기체속으로 흐르는 전류는 어떤 작용을 하는가.

기체속에서 전류의 작용은 기체의 종류와 상태, 전극의 특성과 배치, 기체에 걸린 전압에 따라 서로 다르게 나타난다.

미광방전

독립방전이 기체의 압력에 따라 어떻게 달라지는가.

○ 평판형전극이 들어있는 길이가 0.5m정도 되는 방전관에 수천V의 직류전압을 걸어주고 진공뽐프를 리용하여 기체의 압력을 낮추자. 대기압하에서는 방전이 일어나지 않는다. 즉 전류가 흐르지 않는다.

○ 진공뽐프로 기체의 압력을 낮추면서 방전관을 관찰하자. 기체의 압력이 1 300Pa일 때 전극사이에는 밝은 물결무늬의 방전이 일어난다.

○ 공기를 더 뽑으면 밝은 무늬들이 퍼지면서 밝은 부분이 점차 전체 방전관을 덮는다. 기체의 압력을 300Pa이하로 낮추면 4개의 부분으로 갈라지는 미광방전이 생긴다.

공기를 희박하게 하면 높지 않은 전압에서도 방전이 일어난다.

희박한 기체속에서 연한 빛을 내는 기체방전을 **미광방전**이라고 부른다.

실험자료에 의하면 관속의 기체압력이 150Pa정도일 때 전극사이의 거리 10cm에 400~500V의 전압이 걸리면 방전이 일어난다.(그림 7-16)

그림 7-16. 각이한 기체압력에서 기체방전

왜 미광방전은 외부작용이 없어도 낮은 전압에서 일어나는가.

기체의 압력이 낮으면 전자가 가속될수 있는 거리가 멀어진다.

그러므로 전압이 낮아도 전자는 먼거리를 운동하면서 세게 가속되여 큰 운동에네르기를 가진다.

이 전자들이 전자사태를 일으키므로 외부작용이 없어도 낮은 전압에서 미광방전이 일어난다.

방전관의 길이에 따라 평판모양의 전극을 붙이고 거기에 검류계를 련결하면 매 자리에서의 전압을 측정할수 있다.(그림 7-17)

그림 7-17. 미광방전에서 전압의 측정

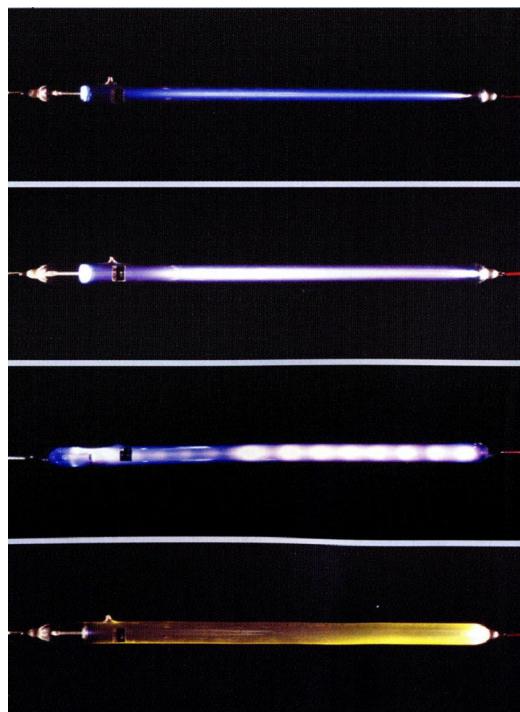
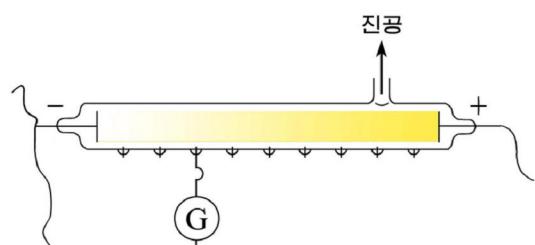
음극으로부터 거리 ℓ에 따르는 전압을 그

라프로 표시하면 그림 7-18과 같다.

그림 7-18. 미광방전에서 $\ell-U$그라프

그라프에서 보는것처럼 음극가까이의 크지 않은 거리에는 심한 전위차가 생기며 **음극암흑부**가 형성된다. 여기에 전기마당의 기본전압이 걸리며 나머지부분에서는 전압이 크지 않다.

음극암흑부는 금속음극으로부터 전자가 방출되도록 가속하는 부분이다.

전자와 충돌하여 생기는 양이온들은 음극으로 향하여 가속되는데 음극암흑부를 지나면서 큰 에네르기를 가진다.

빠른 양이온들은 금속을 때리면서 극판으로부터 전자들을 떼여낸다.(2차전자방출)

이 전자들은 음극암흑부에서 급격히 가속되고 그다음에 원자들과 충돌하면서 다시 이온화시킨다. 그 결과에 음극으로 향하는 양이온이 또다시 나타나며 새로운 전자들을 발생시킨다. 이처럼 방전을 유지하는 기본과정은 공간속에서 전자들의 충돌에 의한 이온화와 음극에서의 2차전자방출이다.

이것들은 모두 음극암흑부에서 일어나므로 음극암흑부는 다른 형식의 기체방전과 차이나는 미광방전의 가장 특징적인 징표이다.

음극암흑부가 있는것은 전자들이 방출되자마자 원자와 충돌하는것이 아니라 음극으로부터 일정한 거리만큼 떨어져서 충돌한다는것을 보여준다.

그러므로 음극암흑부의 길이는 전자들이 충돌없이 가는 거리(자유행로)와 같으며 자유행로는 기체의 압력이 작아짐에 따라 커진다.

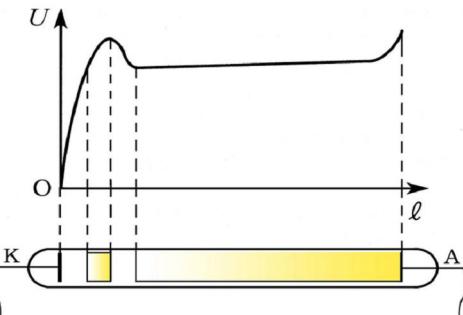
? 그러면 기체방전관속의 매 부분에서 전자와 이온들의 분포와 그 운동이 어떻게 서로 다르겠는가.

방전관의 여러 부분에서 양이온과 전자의 분포는 동일하지 않다.

양이온은 전자들보다 더 천천히 운동하므로 음극주위에서 양이온의 밀도는 전자의 밀도보다 더 크다. 그러므로 음극가까이에는 음극암흑부를 형성하는 강한 양전하공간이 생긴다.

양극부분에 있으면서 빛을 내는 넓은 부분을 **양광부**라고 부른다.

양광부에서는 양이온과 전자의 밀도가 거의 비슷하며 여기에는 전기띤 부분이 없다.

전자들의 밀도가 크기때문에 양광부는 좋은 전도성을 가지며 거기에서는 전압강하가 작다. 양광부에는 +이온과 전자들이 있으므로 이것들의 재결합이 심하게 일어나면서 빛을 낸다.

미광방전은 여러가지 색갈등에서 리용된다.

네온등은 붉은색빛을 내며 아르곤등은 풀색빛을 낸다.(그림 7-19)

형광등에서는 수은증기를 리용한다.

미광방전의 가장 중요한 응용은 기체레이자이다.

그림 7-19. 기체방전관

음 극 선

방전관속의 압력을 더 낮추면 어떻게 되겠는가.

방전관속의 기체의 압력이 0.1～10Pa정도로 낮아지면 관속의 양광부가 없어지고 음극의 맞은쪽 유리벽에 풀색의 형광이 나타난다.

그림 7-20. 음극선이 그림자를 만든다

이것은 음극에서 어떤 선이 복사된다는것을 보여준다.

이것을 음극에서 나오는 선이라는 의미에서 **음극선**이라고 불렀다.

음극선은 무엇으로 이루어졌는가.

음극선의 본질을 조사하기 위하여 여러가지 실험을 진행하였다. 음극선이 나가는 길에 물체를 놓으면 뚜렷한 그림자가 생긴다.(그림 7-20)

이것은 음극선이 립자들의 흐름이라는것을 보여준다. 음극선이 양극에 충돌하면 열을 낸다.

이것은 음극선이 운동에네르기를 가지고있다는것을 보여준다.

또한 음극선이 나가는 길에 날개가 달린 바퀴를 놓으면 바퀴가 돌아간다.

이것은 음극선이 운동량을 가지고있다는것을 보여준다.

그림 7-21. 음극선이 전기 및 자기마당속에서 기울어진다

음극선은 그림 7-21과 같이 자기마당과 전기마당에서 구부러진다. 구부러지는 방향을 보면서 음극선이 어떤 부호의 전기를 띤 립자의 흐름인가를 생각하여라.

음극선은 방전관속에 있는 기체의 종류, 전극과 유리의 재질에 관계없다.

이러한 실험적사실로부터 전자가 발견되였고 음극선은 전자들의 흐름이다는것을 알게 되였다.

문 제

1. 미광방전에서 양이온은 어떤 역할을 하는가?
2. 미광방전에서 음극암흑부의 형성과정을 설명하여라.
3. 희박한 기체속에서의 전류와 금속에서의 전류는 어떤 차이가 있는가?

제 6 절. 대기압에서 일어나는 기체방전

불꽃방전

보통조건에서 공기는 전기마당이 걸리지 않으면 좋은 부도체이지만 두 전극사이에 매우 센 전기마당(약 3×10^6V/m)이 걸리면 이온화되면서 급격한 기체방전이 일어난다.

이온화된 기체들이 일정한 통로를 이루면서 불꽃을 동반하는 방전을 **불꽃방전**이라고 부른다.

불꽃방전은 짧은 시간동안에 큰 전류가 흐르면서 일어난다. 이때 기체속에서 전류흐름길은 복잡한 모양을 그린다.

불꽃방전이 일어날 때 큰 전류가 흐르면서 공기가 가열되여 급격히 불어났다가 식으면서 줄어든다. 그러므로 불꽃방전이 일어날 때 전류가 흐르는 길에 있는 기체분자들은 이온화되고 재결합되면서 센 소리와 함께 빛을 낸다.

그러므로 불꽃방전에서는 전류가 흐르는 길이 뚜렷이 나타난다. 전류가 흐르는 길에 있는 공기는 완전이온화된 상태에 있다.

불꽃방전의 대표적인 실례는 번개이다.

번개는 대전된 구름과 구름사이에서 일어나는 규모가 큰 불꽃방전이며 벼락은 구름과 땅사이에서 일어나는 불꽃방전이다.

번개가 일어날 때 전류의 세기는 수십만A에 달하며 구름과 땅사이에 걸리는 전압은 수십억V에 이른다. 번개는 1만분의 1s정도의 매우 짧은 시간동안에 일어난다.

? 번개가 어떻게 일어나는가.

공기속에는 우주공간에서 날아오는 방사선(우주선)의 작용으로 약간한 량의 전자와 이온이 늘 있다. 센 전기마당이 걸리면 이 전자가 가속되여 전자사태를일으킨다. 전자사태가 일어난 길을 따라 센 전류가 흐르므로 번개의 모양은 일정하지 않으며 매번 다른 형태를 가진다.(그림 7-22)

그림 7-22. 불꽃방전-번개

불꽃방전은 정전발전기나 유도기전기, 유도선륜

등으로 쉽게 관찰할수 있다.

자동차를 비롯한 각종 운수수단에서 발동기속에 있는 연료를 연소시키는 점화전에서도 전기불꽃방전을 리용한다.(그림 7-23)

그림 7-23. 자동차의 점화장치

코로나방전

안개낀 날 밤에 고압송전선주위에서 희미한 기체방전구를 볼수 있다. 이것은 높은 전위로 대전된 도체가 뾰족한 끝을 가지면 그끝으로 전기량이 방전되면서 생기는 현상이다.

대기압하에서 불균일한 강한 전기마당속에 있는 기체에서 왕관(코로나)모양의 빛을 내는 부분을 가지는 방전을 **코로나방전**이라고 부른다.

코로나방전은 어떻게 일어나는가.

도체의 겉면에서 전기량밀도는 곡률반경이 작을수록 더 크다. 즉 뾰족끝에서 전기량의 밀도는 최대이다. 그러므로 뾰족끝주위에는 세기가 3×10^6V/m를 넘는 강한 전기마당이 생긴다. 이러한 높은 전기마당에서는 대기압하에서도 전자들의 충돌에 의하여 이온화가 진행된다. 따라서 첨단근방에서는 전자사태가 일어나며 이로 인하여 전기량이 방전된다.

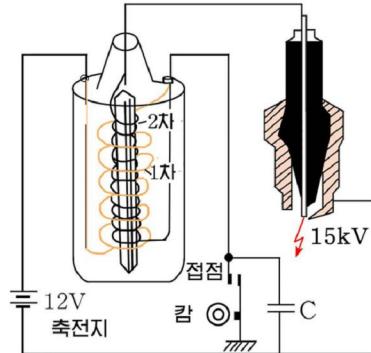
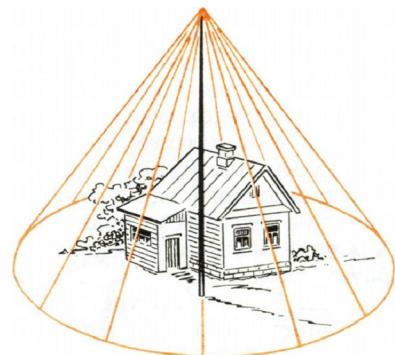
도체의 겉면에서 멀어짐에 따라 전기마당의 세기는 급격히 약화된다. 그러므로 이온화와 기체의 발광은 제한된 공간부분에서만 관측할수 있다.

자료 피뢰침에 의한 건물의 보호

벼락은 특별히 위험하다. 벼락은 건물이나 전선대, 공장굴뚝 등을 파괴할수 있으며 화재를 일으킬수 있다. 번개는 사람이나 동물에게 있어서는 매우 치명적이지만 그런 일은 극히 드물다. 그것은 벼락이 우선 높은 물체와 전기가 잘 통하는 물체들부터 때리기때문이다.

그림 7-24. 피뢰침과 그 보호구역

그러므로 비가 올 때에는 벌판에 홀로 있는 나무나 숲속에 있는 매우 높은 나무가까이에 있지 말아야 한다. 홀로 떨어진 건물이나 전선대를 보호하기 위하여 뾰족끝을 가진 금속줄(피뢰침)을 높이 세워야 한다.(그림 7-24) 이때 금속선은 충분히 굵어야 하며 땅속에 깊이 묻은 금속물체와 잘 련결하여야 한다.

피뢰침의 동작원리를 간단히 다음과 같이 설명할수 있다. 대전된 구름에 의하여 피뢰침에는 반대부호의 전기가 유도된다. 이때 피뢰침은 구름의 전기를 끌어당기는 역할을 한다. 땅우에서 피뢰침의 보호구역은 피뢰침의 높이에 의하여 규정된다.

벼락을 막기 위하여 높은 굴뚝이나 건물의 맨우에 피뢰침을 설치한다.

피뢰침의 한끝은 뾰족끝이고 다른끝은 땅에 묻어놓은 도선이다.

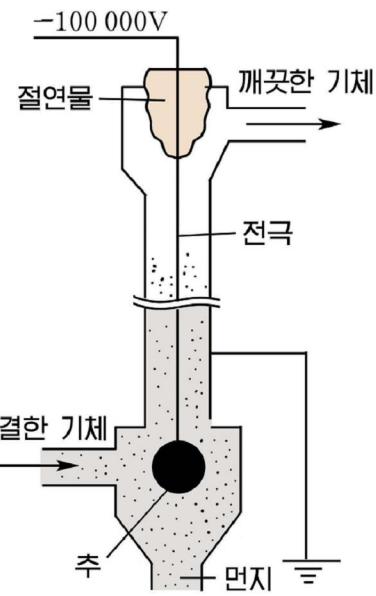
피뢰침이 벼락을 막는 원리는 첨단방전(코로나방전)이다.

대전된 구름이 건물의 가까이에 오면 피뢰침끝에서 코로나방전이 일어나면서 공기를 이온화시키므로 그 부근에서 전기저항이 작아져 구름의 전기량은피뢰침으로 방전되면서 땅속으로 흐른다.

코로나방전은 또한 기체속에 섞인 먼지를 잡아서 기체를 맑게 하거나 굴뚝으로 나가는 연기속에서 먼지를 잡는 장치에 쓰인다.(그림 7-25)

그림 7-25. 코로나방전을 리용하는 먼지잡는 장치

연기가 원통을 거쳐 굴뚝으로 흘러갈 때 원통의 축을 따라 늘인 가는 전기줄에서 코로나방전이 일어난다.

코로나방전구역에서 생긴 전자는 양극으로 가는 도중에 먼지에 붙으며 먼지를 양극원통에 끌려가 붙도록 한다.

호광방전

전기용접을 할 때 낮춤변압기에서 전압을 30∼50V로 낮추고 2차권선에 련결한 두 탄소막대기의 끝을 접촉시켜 빨갛게 가열한 다음 약간 떼면 그사이에 활모양의 불길(호광)이 생기면서 센 빛을 낸다.(그림 7-26) 이 방전을 **호광방전**이라고 부른다.

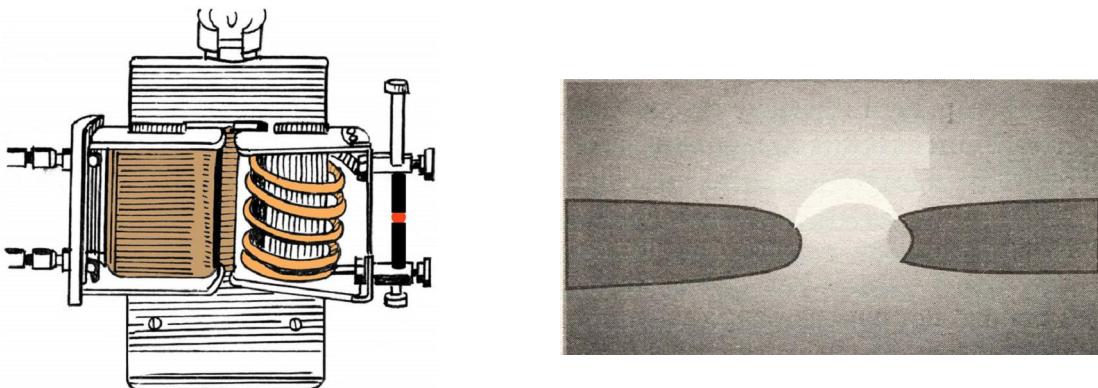



그림 7-26. 호광방전장치와 호광방전모양

호광방전은 어떻게 일어나는가.

탄소막대기의 끝이 가열되면 열전자가 방출된다. 이 열전자들에 의하여 대기압에서도 독립방전이 일어난다.

열전자의 수가 많으므로 전압이 50V일 때에도 전류의 세기는 수A로부터 수백 A까지 된다. 센 전류가 흐르므로 호광속에 있는 기체는 수천K의 높은 온도로 가열되여 눈부신 빛을 낸다.

전자들의 《폭격》에 의하여 +전극에는 우묵한 부분이 형성된다.

대기압일 때 우묵한 곳에서의 온도는 4 000℃에 달하며 압력이 2×10^6Pa일 때의 온도는 7 000℃이다.

호광방전은 탄소봉들사이에서만 생기는것이 아니라 금속전극들사이에서도 일어난다.(그림 7-27)

호광방전은 투영장치, 영사기, 탐조등 같은데서 센 광원으로 쓰인다. 또한 호광방전은 금속을 녹여붙이거나 절단하는 용접에서와 강철을 만드는 전기로에 쓴다.

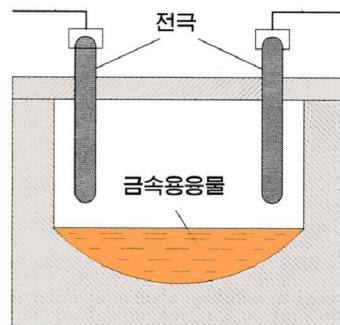



그림 7-27. 전기로

대기압에서 기체방전들을 대비하는 표를 작성하여보아라.(방전전압, 방전형태, 응용 등)

문 제

1. 자동차내연기관에 쓰는 점화장치의 동작원리를 설명하여라.
2. 호광방전이 일어날 때 음극을 식히면 방전이 어떻게 되겠는가?
3. 용접할 때 호광방전이 어떻게 쓰이는가를 설명하여라.

제 7 절. 결정속에서 전자의 에네르기준위

물질의 미시구조적특성을 알려면 그것이 복사하는 빛을 연구하는것이 중요하다.

기체상태에 있는 Na원자의 빛스펙트르는 선스펙트르인데 Na결정의 빛스펙트르는 띠스펙트르이다.

결정속에서 이러한 빛을 내는 전자의 상태는 어떠한가.

결정속에서 전자의 자리에네르기

결정속에서 원자들은 센 결합력에 의하여 주기적인 살창구조를 이루면서 질서있게 배렬되여있다.

원자들사이에 어떤 결합력이 작용하는가에 따라 원자결정, 이온결정, 금속결정, 분자결정, 수소결합결정으로 나눈다.

개별적인 원자에서 전자의 자리에네르기는 정전기마당의 에네르기이므로 전자의 운동반경이 커지면 령으로 되고 운동반경이 작아지면 급격히 감소한다.

이것을 근사적으로 깊은 우물모양의 자리에네르기로 생각할수 있다.(그림 7-28)

그림 7-28. 개별적원자에서 전자의 자리에네르기

이때 전자들은 불련속적인 에네르기준위를 가진다.

원자들이 결정을 이룰 때 전자들이 이웃원자에로 거의 자유롭게 운동할수 있는것은 원자들사이의 자리에네르기가 감소되면서 주기적으로 분포되고 결정경계에서의 자리에네르기(**포텐샬에네르기장벽**이라고도 부른다.)는 높아지기때문이다.(그림 7-29)

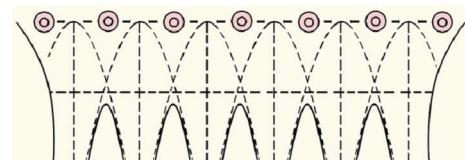
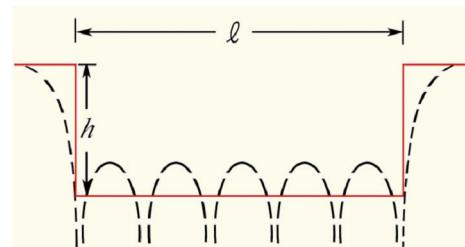



그림 7-29. 결정에서 원자값전자의 자리에네르기

원자들사이의 자리에네르기가 낮아진 부분에서 전자들은 여러 원자들에 공동소유로 있게 되며 경계부분에는 자리에네르기의 언덕이 있으므로 전자가 있을수 없다.

결정에서 원자들모임의 자리에네르기는 근사적으로 길이가 ℓ이고 깊이가 h인 넓은 직각우물형식의 자리에네르기로 바꾸어볼수 있다.(그림 7-30)

h: 포텐샬에네르기장벽의 높이
그림 7-30. 직각우물모양의 결정의 자리에네르기

이러한 근사에서는 개별적원자들의 특성은 지워지지만 원자들의 모임인 결정의 특성은 잘 나타난다.

에네르기띠

원자의 에네르기준위들은 그것이 내는 빛스펙트르를 분석하여 알아볼수 있다.

Na기체는 선스펙트르를 복사하는데 Na결정의 스펙트르는 선스펙트르가 아니라 일정한 폭을 가진 띠스펙트르이다.

❓ 결정에서 띠스펙트르는 왜 생기겠는가.

결정속의 전자들이 직각모양의 자리에네르기우물속에서 존재한다고 보고 전자의 에네르기준위를 구하여보자.

우물속에서는 자리에네르기 U의 값이 일정하므로 전자의 자리에 따르는 파장의

변화가 없다.

이때 결정의 길이를 ℓ이라고 하면 전자파동의 파장이 $\lambda=2\ell/n$이므로 에네르기는

$$E_n=\frac{P_n^2}{2m_0}=\frac{h^2}{2m_0}\left(\frac{1}{\lambda}\right)^2=\frac{h^2}{8m_0\ell^2}n^2 \quad (n=1,\ 2,\ \cdots)$$

로서 n^2에 따르는 불련속적인 값을 가진다.(그림 7-31)

그림 7-31. 정상상태에서 가능한 전자파동의 파장

그런데 여기서 $\ell=0.1$m라고 하여도 에네르기값은

$E_1=\frac{h^2}{8m_0\ell^2}1^2\approx6.0\times10^{-36}$J로서 매우 작다.

따라서 n에 따라 정해지는 에네르기준위들은 거의 련속이라고 볼수 있을만큼 배게 분포되여있으며 에네르기값이 일정한 폭을 가진 띠모양의 준위를 이룬다.

이와 같이 원자들이 결정을 이룰 때 전자가 가지는 매 에네르기준위들이 원자의 개수만큼씩 매우 가까이 갈라져 생기는 띠모양의 에네르기준위를 **에네르기띠**라고 부른다.

그림 7-32. Na원자와 Na결정의 스펙트르

이것을 바로 Na원자와 Na결정의 빛스펙트르에서 알수 있다. Na원자가 내는 선스펙트르는 $3p$준위에 있던 원자값전자가 $3s$준위로 떨어지면서 내는것인데 Na결정이 내는 띠스펙트르속에 포함되여있다.(그림 7-32)

이것은 Na원자가 결정을 이룰 때 원자들이 서로 가까와지면서 그것들의 호상작용에 의하여 개별원자들의 에네르기준위들이 조금씩 갈라져서 띠를 형성한다는것을 보여준다.

그림 7-33. 원자들의 간격과 에네르기띠

이처럼 결정에서 에네르기준위는 띠로 되며 에네르기띠의 폭은 결정에서 원자들사이의 간격이 좁아지면 커진다. 에네르기띠에 전자들이 쉽게 올라갈수 있는 빈자리가 있으면 그아래에 있는 전자들이 자유롭다는것이다.(그림 7-33)

실례로 초고압상태에서는 원자들사이의 거리가 가까와져 에네르기띠들이 넓어지면서 서로 겹치여 빈자리가 많아지므로 전자들이 고체속으로 쉽게 이동할수 있다. 즉 전기전도성이 좋아진다.

도체, 부도체, 반도체의 에네르기띠

결정상태로 이루어진 전자재료들은 전기전도성이 서로 다르다. 금속과 같이 전기전도성이 좋은 도체들은 비저항이 10^{-10}~10^{-4} Ω·m이고 사기나 운모와 같이 전기전도성이 나쁜 부도체들은 비저항이 10^{6}~10^{14} Ω·m이다.

왜 같은 결정상태에서 물체들의 전기전도성이 다른가.

일반적으로 주어진 조건에서 결정속의 원자들사이의 거리는 임의의 값을 가질수 없으며 고정된 값을 가진다.

개별적원자들이 가까이 접근하여 결정을 이룰 때 원자값전자의 바닥준위와 려기준위는 에네르기띠로 따로따로 갈라진다.

이때 원자값전자의 바닥준위가 갈라져 생기는 에네르기띠를 **값전자띠**라고 부르며 에네르기준위에 전자들이 가득찬 값전자띠를 **충만띠**라고 부른다. 그리고 에네르기준위에 전자들이 부분적으로 찬 값전자띠나 려기준위가 갈라지면서 생기는 에네르기띠를 **전도띠**라고 부른다.

도체, 부도체, 반도체는 전자들이 값전자띠를 채운 정도와 금지띠의 너비에 따라 갈라본다.

도체에서 에네르기띠는 어떻게 되겠는가.

Na($1s^2$ $2s^2$ $2p^6$ $3s^1$)원자 N개가 뭉쳐 결정을 이룰 때 값전자띠인 $3s$에네르기띠는 매우 밴 N개의 준위로 갈라진다.

Na결정의 원자값전자들은 에네르기가 낮은 준위로부터 채워간다.

매 준위에는 파울리의 원리에 의하여 스핀이 서로 반대인 전자가 두개씩 들어가므로 $3s$에네르기띠에는 전자가 절반만 차있고 웃부분은 비여있다.(그림 7-34)

그림 7-34. Na결정은 값전자띠인 3s띠에 전자가 절반 채워진다

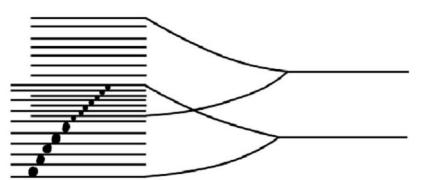
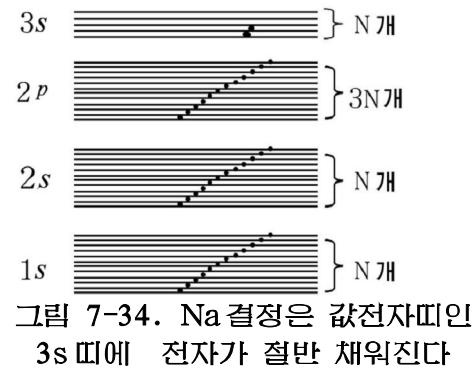
그러나 Mg와 같은 2가금속결정들은 값전자띠와 그우의 전도띠가 겹치여 구분되지 않는다.

따라서 2개의 원자값전자들이 $3s$에네르기띠를 가득 채우지만 전자들이 쉽게 다른 준위로 오를수 있다.(그림 7-35)

그림 7-35. 띠웃자리가 비려면 값전자띠와 전도띠가 겹쳐도 된다

부도체와 반도체의 에네르기띠는 어떻게 다른가.

사기나 운모, 류황과 같은 부도체에서는 값전자띠가 도체와 다르게 구성되여있다.

부도체에는 충만띠가 있고 그우에 일정한 간격을 두고 텅빈 전도띠가 있다.

에네르기띠에서 전자들이 가질수 없는 에네르기구간을 **금지띠**라고 부른다.

부도체에서 금지띠의 너비는 3eV이상이다.

그러나 반도체인 Si나 Ge과 같은 물질들의 에네르기띠는 부도체와 같은 형식인데 금지띠의 너비가 좁다.

그러므로 반도체에서는 열이나 빛의 작용에 의하여 전자들이 금지띠를 넘어가 전기전도성을 가진다.(그림 7-36)

<ins>금지띠의 너비가 크면 부도체로 되고 금지띠의 너비가 작으면 반도체로 된다.</ins>

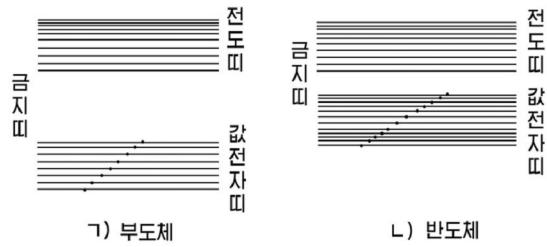



그림 7-36. 부도체, 반도체의 에네르기띠

문 제

1. 왜 결정에서는 에네르기띠가 생기는가?
2. 도체, 부도체, 반도체에서 에네르기띠는 어떻게 다른가?

제 8 절. 반도체와 그의 특성

오늘 정보처리수단인 콤퓨터를 비롯한 전자기구들의 눈부신 발전은 반도체물리학의 발전에 기초하고있다.

반도체의 특성이 무엇인가를 보자.

반도체의 비저항은 도체와 부도체사이의 비저항값 10^{-4}～10^{6}Ω·m를 가진다.

이것은 반도체의 구조와 관련된다.

반도체의 구조와 에네르기띠

반도체의 구조적특징을 알려면 대표적인 반도체물질인 규소결정의 구조를 보아야 한다.

Si원자가 홀로 있을 때는 바깥층에 2개의 $3s$전자와 2개의 $3p$전자가 있다.

Si원자들이 결정을 이룰 때에는 s상태를 2개의 전자가 채우고 p상태에 2개의 전자가 들어가는것이 아니라 sp^3혼성자리길이 이루어져서 4개의 원자값전자가 일정한 각(109° 28′)을 짓는 전자구름을 결합손으로 하여 공유결합을 이룬다. 이리하여 금강석모양의 살창구조가 형성된다.(그림 7-37)

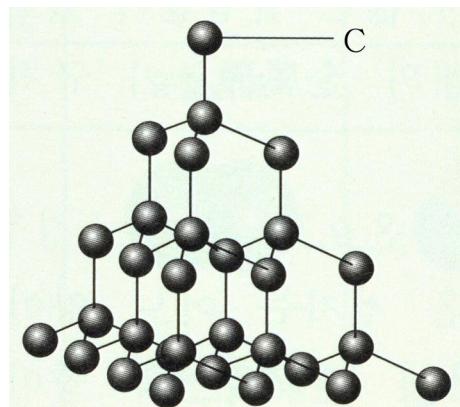



그림 7-37. 금강석형살창구조

원자들이 가까이 접근하여 결합될 때 생기는 값전자띠와 전도띠사이에는 금지띠가 있다. 규소결정에서 값전자띠는 sp^3혼성자리길이고 그우에 전도띠가 있다.

sp^3혼성자리길은 4개의 전자가 들어가면 다 차므로 공유결합을 한 결정의 값전자띠는 꽉 찬다. 금강석은 금지띠의 너비가 6eV로서 크지만 Si, Ge 등은 금지띠의 너비가 1.1eV, 0.67eV로서 열운동에네르기나 빛량자에네르기정도이다.

고유반도체의 전기나르개

규소결정이나 게르마니움결정과 같은 순수한 반도체를 **고유반도체**라고 부른다.

온도가 낮고 어두운 곳에서 반도체에 전기마당을 걸어주어도 전류는 흐르지 않는다. 이것은 값전자띠의 전자들이 이러한 상태에서는 이동하지 않기때문이다. 다시말하여 이 전자들은 공유결합에 의하여 속박되여있어서 먼거리로 전기량을 나를수 없다.

전류를 만들려면 전자들을 전도띠에 올려놓아야 한다.

○ 반도체에 μA전류계와 건전지를 직렬로 련결한다. 전류가 거의 흐르지 않는다.

○ 규소반도체의 온도를 높여주면서 여기에 전원을 련결하면 전류가 흐른다.

○ 게르마니움반도체에 빛을 쪼여주면서 전원을 련결하면 전류가 흐른다.

○ 반도체를 액체질소속에 넣으면 전류가 흐르지 않는다.(그림 7-38)

그림 7-38. 반도체의 전류의 세기

규소나 게르마니움결정에 열에네르기와 빛에네르기를 줄 때 전류가 흐르는것은 반도체에 빛을 쪼여주거나 온도를 높여주면 값전자띠의 일부 전자가 전도띠에 오르기때문이다.

전도띠의 전자는 결정속을 자유로이 운동할수 있다. 그러므로 전도전자는 전기량을 나를수 있는 전기나르개로 된다.

반도체에서 전도전자만이 전기량을 나르는가.

규소결정에서 전자들은 공유결합을 이루면서 규칙적으로 분포되여있다.(그림 7-39)

외부작용으로 원자값전자가 떨어져나가면 그 자리에 빈자리가 생긴다. 이것을 **구멍**이라고 부른다.

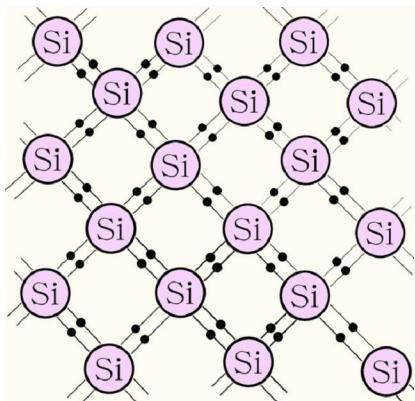



그림 7-39. 규소반도체구조

원자값전자가 있을 때에는 전자의 전기량과 이온의 전기량이 상쇄되지만 전자가 없을 때에 구멍은 +전기를 띤다.

구멍은 에네르기적으로 불안정한 자리이므로 안정하게 되기 위하여 전자를 받아들이려 한다. 즉 이웃에서 공유결합을 이루고있던 원자값전자가 빈자리로 옮겨와 구멍을 메꿀수 있다. 이때 옮겨간 전자가 있던 자리에 구멍이 생긴다. 이처럼 구멍은 제자리에 머물러있지 않고 옮겨다닐수 있다.

그림 7-40. 전도전자와 구멍이 생기는 과정

보통때는 이런 공유결합된 전자들의 운동이 무질서하게 일어나지만 외부전기마당이 걸리면 구멍들은 모두 전기마당의 방향으로 집단이동하면서 전기량을 나른다.(그림 7-40)

그림 7-41. 전도전자와 구멍의 이동

sp^3혼성자리길의 원자값전자들이 구멍을 리용하여 이동하면서 나르는 전류를 **구멍전류**라고 부른다.

반도체의 전기나르개인 전도전자와 구멍은 같은 전기마당의 작용을 받으면 서로 반대로 이동한다.(그림 7-41)

구멍은 전도전자들이 떨어져나온 자리이므로 전도전자의 밀도와 구멍의 밀도는 같다. 전도전자의 밀도는 금지띠의 값과 전자의 열운동에네르기에 관계된다. 즉 전기나르개의 밀도는 온도가 높아지면 매우 커진다.

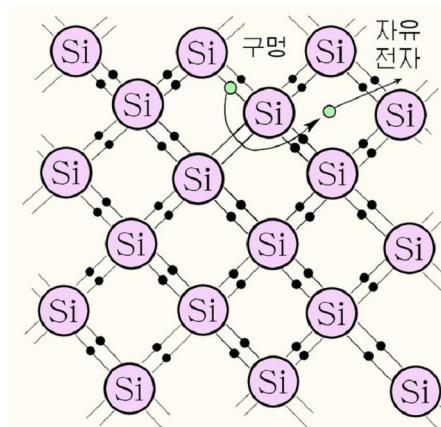
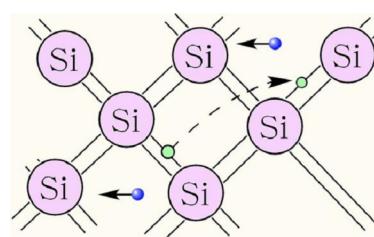
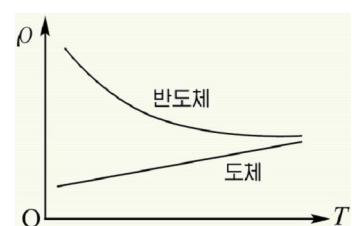
보통온도에서 반도체의 전도전자수는 원자값전자보다 매우 작다. 실례로 순수한 Si반도체는 50℃ 때 $1cm^3$속에 약 10^{10}개의 전도전자가 있지만 원자값전자는 약 10^{23}개에 달한다.

순수한 반도체의 전기전도성은 전도전자들의 이동(전자전도성)과 빈자리가까이에 있는 결합전자들의 이동(구멍전도성)에 의하여 나타난다.

고유반도체의 특성

반도체의 비저항은 도체와 부도체의 중간값을 가지며 열, 빛과 같은 외부작용에 따라 예민하게 변한다. 도체와 반도체의 비저항이 온도에 따라 변하는 정도를 조사하여 보면 금속의 비저항은 온도에 따라 직선적으로 증가하지만 반도체의 비저항은 급격히 감소한다.(그림 7-42)

그림 7-42. 온도에 따르는 비저항의 변화

금속의 비저항과 반도체비저항의 온도효과가 왜 서로 다른가.

금속의 저항은 전도전자들과 금속원자들의 호상작용에 의하여 생긴다.

온도가 높아지면 전도전자들과 원자들의 열운동이 심해지면서 호상작용이 더 자주, 더 강하게 나타나므로 비저항이 커진다.

반도체에 열을 주거나 빛을 쪼여주면 값전자띠의 전자가 전도띠에 오르면서 전기나르개의 수가 급격히 많아지므로 전류가 커진다. 이것은 반도체의 비저항이 작아지는것과 같은 효과이다.

이러한 반도체의 특성은 순수한 멘델레예브원소주기표 14족원소반도체에서만 나타나는가.

고유반도체의 구조적특성은 결정을 이룰 때 sp^3형혼성전자구름을 형성하며 이것을 결합손으로 하여 공유결합을 이루어 금강석모양의 살창구조가 생긴다는것이다.

이러한 구조는 단순물이 아닌 화합물 ZnS, GaAs, InSb 등에서도 이루어진다.

이러한 고유반도체를 **화합물반도체** 혹은 **AB형화합물반도체**라고 부른다.

-물반도체로 되는 물질들을 찾고 분자식을 써라.

문 제

1. 고유반도체에서 전기나르개의 발생과정을 설명하여라.
2. 반도체의 구조적특징을 Ge의 실례에서 밝히여라.
3. 고유반도체의 특성을 설명하여라.

제 9 절. 혼입물반도체

고유반도체는 전기나르개의 밀도가 크지 않아 쓸모가 적다.

이 결함을 어떻게 극복하겠는가.

반도체의 중요한 특성의 하나는 고유반도체에 원자값이 다른 원소를 매우 적은 량 넣을 때 비저항이 크게 달라지는것이다.

반도체원자 10^6～10^{10}개당 혼입물원자를 하나정도 넣어도 비저항이 매우 작아진다. 이처럼 고유반도체에 혼입물을 넣어 만든 반도체를 **혼입물반도체**라고 부른다.

고유반도체에 어떤 원자값의 혼입물을 넣었는가에 따라 n형반도체와 p형반도체로 나누어본다.(그림 7-43)

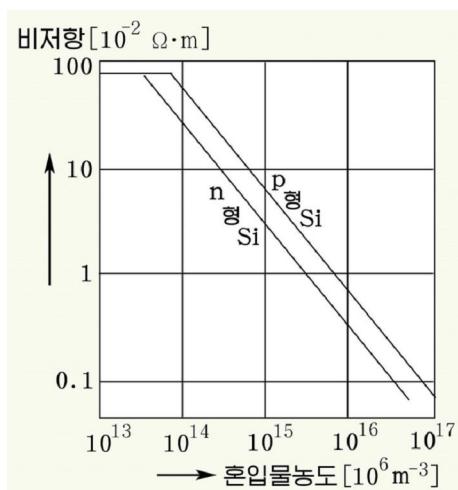



그림 7-43. 혼입물을 넣으면 비저항이 작아진다

n 형반도체

반도체에서 전기나르개는 전도전자와 구멍이다.

반도체에 어떤 원자값의 혼입물을 넣는가에 따라 전도전자의 밀도를 크게 할수도 있고 구멍의 밀도를 크게 할수도 있다.

먼저 14족원소인 4가의 규소결정에 5가의 린 P를 넣었다고 하자.

규소결정속에서 린원자는 살창점에 놓여있는 어느 한 규소원자를 밀어내고 그 자리에 들어간다. 이때 린원자는 본래 있던 규소원자를 대신하여 이웃하고있는 4개의 규소원자들과 공유결합하게 된다. 그러면 5개의 값전자들가운데서 4개만이 공유결합에 참가하고 나머지 한개는 남는다.(그림 7-44의 ㄱ) 이 나머지전자는 다만 린원자핵에 꿀롱힘에 의해 결합되여있다.

그림 7-44. 규소에 린을 넣었을 때 결합상태

절대령도근방에서 꿀롱힘에 의하여 결합된 전자는 공유결합된 전자들보다 훨씬 약하게 린원자에 매여있다.

실례로 수소원자속에서 전자가 바닥상태에 있다면 13.6eV의 에네르기를 주어야 떨어져나가지만 Si결정속에 있는 P^+에서 전자를 떼내는데는 0.044eV의 에네르기면 된다. 이것은 이 속박전자의 에네르기준위가 전도띠의 바닥보다 조금 아래에 있다는것을 의미한다.(그림 7-44의 ㄴ)

절대령도근방에서 반도체속에는 전기나르개인 전도전자와 구멍이 없다.

절대령도로부터 온도를 점차 높이면 린원자에 꿀롱힘에 의하여 결합된 전자가 먼저 떨어져나와 전도전자로 된다. 그리고 중성이던 린원자는 +이온으로 된다.

린이온은 규소원자와 든든하게 공유결합을 이루고있으므로 절대로 이동할수 없다. 그러므로 린원자에서 전자가 떨어져나와도 구멍은 생기지 않는다. 이처럼 규소에 섞어넣은 린원자는 규소결정에 전도전자를 내주는 역할을 한다.

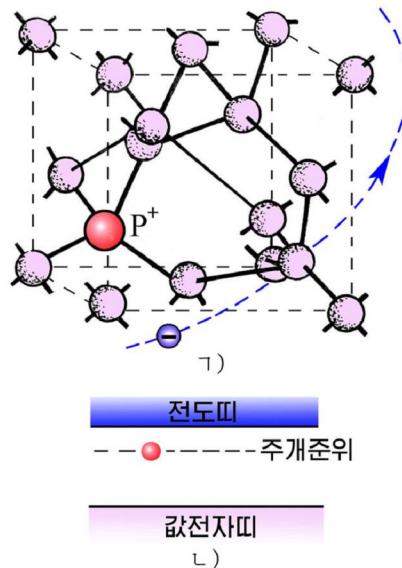
반도체결정에서 전도전자를 내주는 혼입물을 **주개**라고 부르며 이러한 혼입물전자의 준위를 **주개준위**라고 부른다.

주개준위에 있던 전자가 떨어져나올 때는 구멍이 생기지 않는다. 그러므로 이때는 전도전자가 구멍보다 훨씬 많으므로 전도전자가 기본전기나르개, 구멍이 비기본전기나르개이다.

기본전기나르개가 전도전자인 주개준위가 있는 반도체를 **전자반도체** 또는 **n형반도체**라고 부른다.

p형반도체

규소결정속에 3가의 붕소 B를 넣었다고 하자.

붕소원자 역시 살창점에 놓여있는 어느 한 규소원자를 밀어내고 그 자리에 들어

앉는다. 이때 붕소원자는 이웃에 있는 4개의 규소원자들과 공유결합을 이루게 된다.(그림 7-45의 ㄱ)

붕소원자는 3개의 값전자를 가지고있다. 때문에 이웃한 4개의 규소원자들중 3개만 공유결합을 이루고 한개는 공유결합을 이루지 못한채로 있게 된다. 이것이 절대령도에서 실현되는 상태이다.

붕소원자는 공유결합을 완성하지 못하였으므로 전자를 끌어당겨 빈자리를 없애려고 한다. 온도를 점차 높이면 이웃에 있는 전자의 운동이 심해지는데 이때 붕소원자는 이 전자를 끌어당겨 공유결합을 완성한다. 붕소에 전자를 빼앗긴 자리는 빈자리로 되는데 이것이 곧 구멍이다. 이때 중성이던 붕소원자는 －이온으로 된다. 붕소이온도 규소원자와 든든히 결합되여있으므로 절대로 움직일수 없다. 이처럼 붕소원자는 규소결정에서 전자를 받아들이는 역할을 한다.

그림 7-45. Si에 B를 넣었을 때

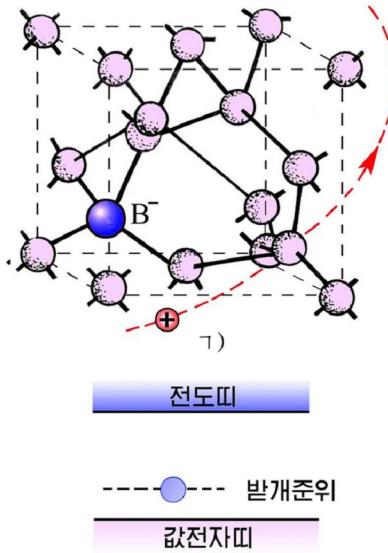
반도체결정에서 전자를 받아들이면서 구멍이 생겨나게 하는 혼입물을 **받개**라고 부른다.

에네르기띠에서 볼 때 값전자띠보다 조금 우에 생긴 혼입물의 준위를 **받개준위**라고 부른다.(그림 7-45의 ㄴ)

받개준위는 값전자띠에 있던 전자를 받고 그 자리에 구멍을 만든다. 받개준위에 놓인 전자는 이동할수 없으므로 구멍의 수가 전도전자의 수보다 많다. 그러므로 3가원소를 혼입물로 넣은 반도체에서는 구멍이 기본전기나르개, 전도전자가 비기본전기나르개로 된다.

기본전기나르개가 구멍인 받개준위가 있는 반도체를 **구멍반도체** 또는 p**형반도체**라고 부른다.

혼입물반도체에서 혼입물원소의 이온화에네르기

물질	혼입물원소		이온화에네르기 [eV]	물질	혼입물원소		이온화에네르기 [eV]
Si	5가원소	P	0.044	Ge	5가원소	P	0.012 0
		As	0.049			As	0.012 7
		Sb	0.039			Sb	0.009 6
		Bi	0.069				
	3가원소	B	0.045		3가원소	B	0.010 4
		Al	0.057			Al	0.010 2
		Ga	0.065			Ga	0.010 8
		In	0.16			In	0.011 2

반도체의 금지띠너비는 1eV정도인데 혼입물의 이온화에네르기는 0.01eV정도이

므로 혼입물의 에네르기준위의 간격은 금지띠너비의 약 1%정도이다.

만일 반도체에 3가혼입물과 5가혼입물을 동시에 넣어주면 반도체의 전도특성은 보다 높은 밀도를 가진 혼입물에 의하여 규정된다.

문 제

1. 주개준위와 받개준위는 어떤 물질들에 생기는가?
2. 금속에서는 불순물이 많으면 비저항이 커지는데 반도체에서는 혼입물이 많으면 비저항이 작아진다. 그 리유는 무엇인가?
3. 다음의 표현이 옳은가, 그른가? 왜 그런가?
   n형반도체는 여분의 전자가 있어 －전기를 띠며 p형반도체는 전자가 부족하여 ＋전기를 띤다.

제 10 절. p-n 이음

반도체는 각종 전자회로에서 전자들의 움직임을 조절하는 전자요소로 쓰인다. 보이지 않는 전자들의 운동을 조절하려면 반도체의 전기나르개인 전자나 구멍에 전기적작용을 줄수 있는 방법이 있어야 한다.

반도체속에 국부적인 전기마당을 만들수 없겠는가.

p-n이음

하나의 반도체결정안에 서로 다른 혼입물을 넣어 p형반도체와 n형반도체가 서로 맞붙어있도록 하였을 때 두 종류의 반도체사이에 생기는 좁은 층을 **p-n이음**이라고 부른다.

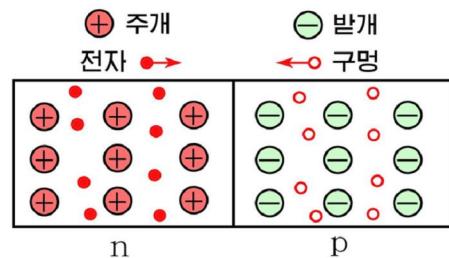
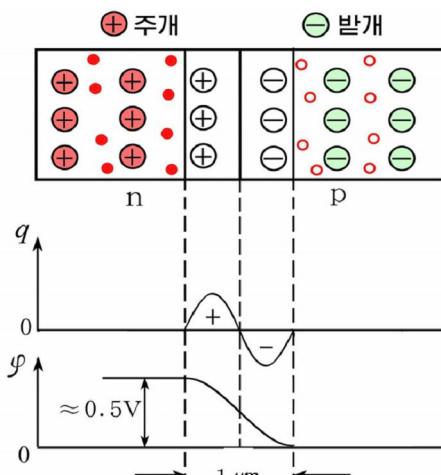
p-n이음에서는 열운동에 의하여 전기나르개들이 접촉경계를 거쳐 확산된다.(그림 7-46)

그림 7-46. 전자와 구멍이 퍼진다

이때 n형반도체에 있는 전도전자들은 전자수밀도가 훨씬 적은 p형반도체로 퍼져가 구멍과 결합되며 반대로 구멍은 p형반도체에서 n형반도체쪽으로 퍼져가 전자와 결합된다.

이리하여 이음층가까이에 있는 p형반도체쪽은 〈－〉전기를 띠고 n형반도체쪽은 〈＋〉전기를 띤 전기2중층이 생긴다.(그림 7-47)

그림 7-47. p-n이음에 전위차가 생긴다

전기2중층은 서로 반대부호의 전기를 띠였으므로 멀리 퍼져가지 못하고 가까이에 놓여 더

퍼져오려는 전자와 구멍의 이동을 방해하면서 평형을 이룬다.

전기2중층이 생기는 과정을 전위로 설명하여보자.

전자와 구멍의 확산에 의하여 p형반도체쪽은 부의 전위를 가지고 n형반도체쪽은 정의 전위를 가진다. 따라서 n형반도체부분이 p형반도체부분보다 높은 전위를 가지며 이음층에는 전위차가 생긴다.

p-n이음에 생긴 전기마당의 세기의 방향은 n형반도체에서 p형반도체쪽으로 향한다. 이 전위차는 전자와 구멍이 더는 확산되지 못하게 막는다.

그림 7-48. 이음층에서 생기는 전위차

전자와 구멍의 확산이 평형상태에 이르렀을 때의 전위차를 **접촉전위차**라고 부른다.

외부전기마당이 작용하지 않을 때 p-n이음에서는 기본전기나르개들이 결합되여 그 수가 작아지므로 전기저항이 매우 크다.

이 이음층의 전기마당에서 서로 반대부호를 가진 기본전기나르개와 비기본전기나르개의 전위차는 서로 반대로 생긴다.(그림 7-48)

따라서 평형상태에서 생기는 접촉전위차에 의하여 전체 전류는 령이다.

$$i = i_{기본} - i_{비기본} = 0$$

p-n **이음의 작용**

p-n 이음은 전기나르개의 운동에 어떤 작용을 하는가.

p형반도체쪽에 전원의 －극이, n형반도체쪽에 전원의 ＋극이 놓이도록 전기마당을 주면 전자는 ＋극쪽으로, 구멍은 －극쪽으로 끌린다. 즉 기본전기나르개들은 p-n이음에서 멀어지는 힘을 받는다.

결과 p-n이음이 두터워지고 전기저항이 커져 전류는 거의 흐르지 못한다.

다시말하여 p-n이음에 생긴 전기마당과 외부전기마당의 방향이 일치하여 p-n이음의 전기마당이 강하여지므로 기본전기나르개의 이동을 심히 방해한다. 그러나 비기본전기나르개는 기본전기나르개와 반대부호의 전기를 띠였으므로 p-n이음의 전기마당을 쉽게 통과할수 있다.

비기본전기나르개가 만드는 극히 작은 전류를 **거꿀방향전류**라고 부른다.

반대로 p형반도체쪽에 전원의 ＋극을, n형반도체쪽에 전원의 －극을 이으면 반도체의 기본전기나르개들은 p-n이음쪽으로 힘을 받아 이동하므로 p-n이음의 두께가 얇아진다. 다른 말로 p-n이음의 전기마당과 외부전기마당의 방향이 반대이므로 p-n이음의 전기마당의 세기가 약하여지며 기본전기나르개들이 이동하여 전류가 흐른다. 이것을 **바른방향전류**라고 부른다.(그림 7-49)

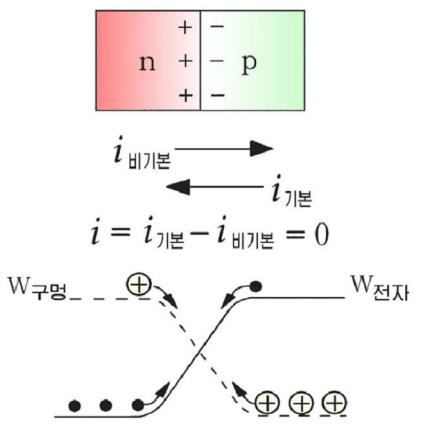
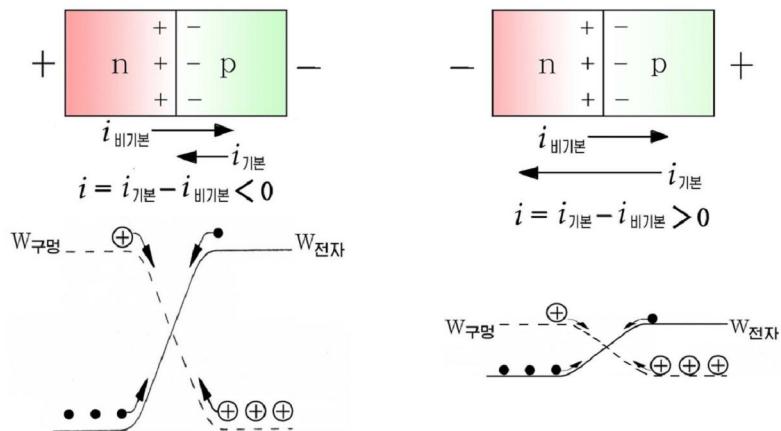



그림 7-49. 외부전기마당이 작용할 때 접촉전위차

문 제

1. p형반도체와 n형반도체를 접촉시켜놓으면 p-n이음이 생기겠는가? 원인을 밝혀라.
2. p-n이음이 만드는 전기마당의 세기는 무엇에 관계되는가?
3. p-n이음에서 비기본전기나르개의 이동과정을 설명하여라.

제 11 절. 반도체 2 극소자

p-n 이음을 리용하면 어떤 전자요소가 만들어지겠는가.

하나의 반도체결정안에 하나의 p-n이음이 있는 반도체소자를 **반도체2극소자**라고 부른다.

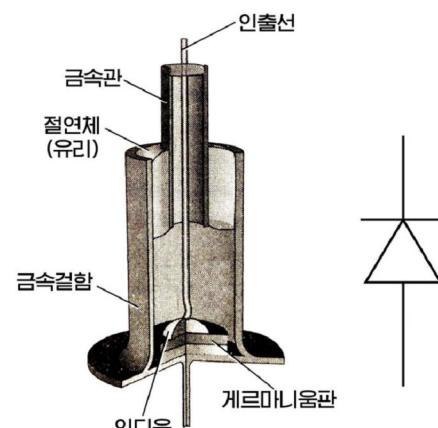
반도체 2 극소자만들기

반도체2극소자는 이음층의 구조에 따라 면접촉2극소자, 점접촉2극소자로 가른다.

면접촉2극소자는 n형반도체결정우에 3가원소(In, Al 등)의 물질들을 놓고 가열하여 경계면을 녹여서 합금으로 되게 한것이다. 이음층에서는 n형반도체속으로 In이 녹아들어가면서 p형반도체로 된다. 이밖에 p형반도체우에 n형반도체를 만드는 방법도 많이 쓴다.

그림 7-50. 반도체2극소자의 구조

점접촉2극소자는 반도체판우에 끝이 뾰족한 금속바늘을 접촉시켜 만든것이다.

반도체2극소자만들기를 처음으로 만들어진 게르마니움반도체2극소자의 내부구조에서 알아보자.(그림 7-50)

게르마니움판의 한쪽 겉면에 인디움방울이 녹아붙어있고 판의 다른쪽 겉면은 금속겉함에 석으로 납땜되였다.

녹일 때 인디움원자들이 게르마니움속으로 확산하여 구멍전도성을 가진 경계층을 만든다. 인디움원자들이 들어가지 못한 나머지부분은 전자전도성을 가진다.

그 결과에 게르마니움판속에는 서로 다른 전도성을 가진 두개의 부분이 생긴다.

p-n이음이 안전하게 동작하도록 게르마니움판은 금속겉함에 넣어 밀봉하였다.

판으로부터 2개의 인출선이 나갔는데 그중의 하나는 유리로 본체와 절연시킨 금속관속으로 지나갔다. 온도가 높아질 때 반도체2극소자의 정류특성이 나빠지기때문에 금속체는 랭각을 좋게 하기 위하여 중절모자모양으로 만들었다.

※ 온도가 높아지면 비기본전기나르개의 밀도가 커지며 거꿀방향전류가 증가한다.

다른 반도체들도 이와 류사한 구조를 가진다.

전자회로에서 반도체2극소자의 표시는 그림 7-50의 ㄴ와 같이 한다.

반도체2극소자의 전압−전류특성

반도체2극소자의 중요한 특성은 소자에 걸어준 전압과 전류사이의 관계이다.

이 관계를 실험으로 알아보자.

○ 반도체2극소자에 변하는 직류전압을 줄수 있도록 회로를 구성한다.

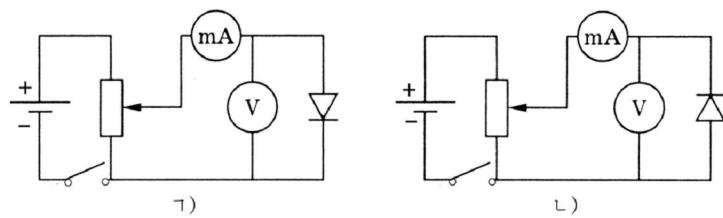



그림 7-51. 반도체2극소자 전압-전류특성실험회로도

○ 정의 방향으로 직류전압을 걸어주고 전압과 전류의 세기값을 측정한다.

○ 반도체2극소자를 반대로 련결하여 거꿀방향의 전압을 걸고 전류의 세기값을 측정한다.

○ 가변저항기로 반도체2극소자에 걸리는 직류전압을 넓은 범위에서 변화시키면서 전류를 측정하여 표를 작성하고 그라프를 그린다.

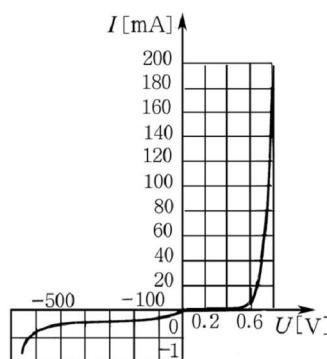



그림 7-52. 반도체 2극소자의 전압−전류특성곡선

※ 그라프를 대비적으로 나타내기 위하여 거꿀방향의 전압은 다른 척도로 표시하였다.

실험에서 얻은 전압-전류특성그라프를 어떻게 설명할수 있는가.

바른방향으로 전압을 걸었을 때 전류의 세기는 전압이 커짐에 따라 매우 빨리 증가한다. 거꿀방향으로 전압을 걸었을 때 전류의 세기는 매우 작으며 전압이 커져도 거의 변하지 않는다.

반도체2극소자의 전압-전류특성그라프는 옴의 법칙이 성립하지 않는다는것을 보여준다. 바른방향으로 걸어준 전압을 높일 때 전류의 세기는 매우 천천히 증가하다가 어떤 전압에 이르면 급격히 커지기 시작한다. 이때의 전압을 **턱전압**이라고 부르는데 턱전압보다 높은 전압에서 전류의 세기는 지수함수모양으로 증가한다.

그것은 턱전압보다 높은 전압에서는 p-n이음에 있는 전위차가 매우 낮아져 기본전기나르개들이 세게 이동하게 되기때문이다.

거꿀방향으로 걸어준 전압을 높일 때 전류의 세기는 매우 작고 거의 일정하다가 일정한 값이상으로 높이면 전류가 갑자기 커지면서 p-n이음이 파괴된다.

이때의 전압을 **파괴전압**이라고 부른다.

반도체2극소자의 이러한 특성을 어디에 리용하겠는가.

p-n이음의 성질은 교류를 직류로 바꾸는데 리용된다.

반도체2극소자에 교류전압을 걸어주면 p-n이음에 바른방향전압이 걸리는 반주기에만 전류가 흐르고 거꿀방향전압이 걸리는 반주기에는 전류가 실제적으로 령이 된다.

반도체2극소자는 그 재질과 구조에 따라 약한 직류뿐만아니라 수백A의 매우 큰 직류를 얻는 정류기에도 쓰인다.

반도체정류기는 라지오, 록음기, TV, 콤퓨터와 같은 거의 모든 전자제품들에 쓰이는데 전자관을 완전히 밀어냈다고 볼수 있다.

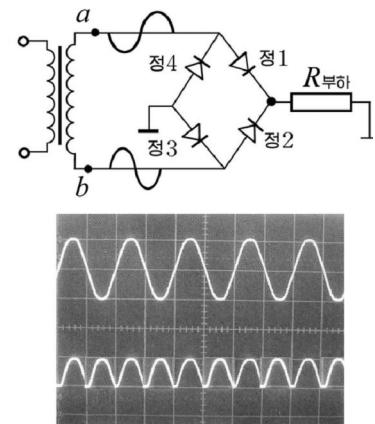
센 직류를 얻는 반도체2극소자는 전동차에 직류를 공급하는 견인변전소와 전기분해작업장에서 교류를 정류하는데도 리용한다.

반도체정류기에는 흔히 면2극소자를 쓴다. 그것은 p-n이음이 넓어 전류가 많이 흐를수 있기때문이다.

점접촉2극소자는 보통 전류가 적게 흐르는 높은 주파수의 전자회로에서 검파소자로 리용된다.

그림 7-53. 다리정류회로

정류기에 2극소자 1개를 쓰면 반파정류회로가 되며 2개를 쓰면 전파정류회로가 된다. 흔히 정류소자 4개로 다리정류회로를 만들어쓴다.(그림 7-53)

문 제

1. 반도체2극소자의 제작에서 p-n이음의 형성과정을 설명하여라.
2. 반도체2극소자의 전압-전류특성실험을 할 때 mA전류계를 소자에 먼저 직렬로 련결

하면 정확도가 높아지겠는가, 낮아지겠는가?

3. 반도체2극소자에서 거꿀방향전류는 왜 매우 작으며 전압에 관계없이 거의 일정한가?
4. 반도체2극소자를 2개 쓴 전파정류회로보다 다리정류회로가 좋은점은 무엇인가?

제 12 절. 반도체 3 극소자

반도체속에 p-n이음이 여러개 있으면 어떤 전자요소가 되겠는가.

하나의 반도체결정안에 2개의 p-n이음이 있는 반도체소자를 **반도체3극소자**라고 부른다. 여러가지 반도체기구들의 제작에서 반도체3극소자는 중요한 자리를 차지한다.

반도체3극소자의 구조

반도체3극소자에서는 p형반도체층과 n형반도체층이 서로 엇바뀌여 3개의 층을 이루고있다. 가장 널리 보급된 반도체3극소자는 평면형3극소자이다.

반도체2극소자와 같이 3극소자를 만들 때 기본은 두께가 100μm정도이고 면적이 2～4mm^{2}인 약간한 혼입물을 가지고있는 반도체단결정(Ge 혹은 Si)판이다.

그림 7-54. 반도체 3극소자의 구조와 표시방법

단결정판의 두 측면에 혼입물을 넣고 로속에서 가열하면 판의 두 반대쪽에는 단결정기초판과 다른 형의 반도체층이 생기면서 접촉경계에는 두개의 p-n이음이 생긴다.

결정의 중간부분이 p형이면 **npn형3극소자**라고 부르며 중간부분이 n형이면 **pnp형3극소자**라고 부른다.

3극소자의 기초로 되고있는 가운데층에서 빼낸 전극을 **기초극**이라고 부르며 그옆의 층들에서 빼낸 전극을 각각 **방사극**, **수전극**이라고 부른다.

기초극부분은 10～20μm정도로 얇게 되여있으며 방사극과 수전극은 크기에서만 차이난다.

수전극의 직경은 방사극의 직경보다 2배정도 더 크다. 반도체3극소자의 표시는 그림 7-54와 같이 약속되여있으며 처음으로 만들어진 반도체3극소자의 내부구조는 그림 7-55와 같다.

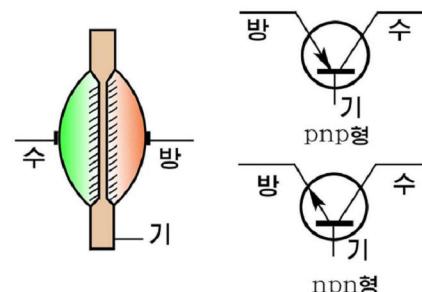
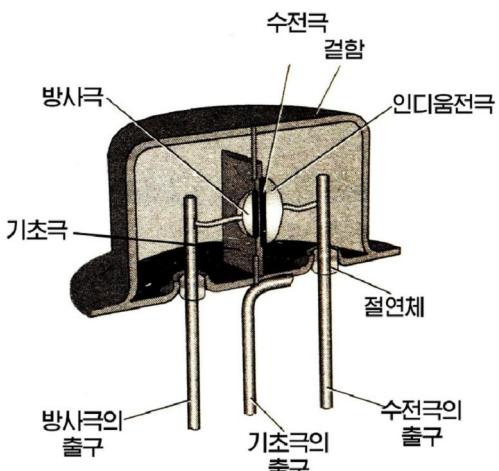



그림 7-55. 반도체 3극소자의 내부구조

반도체 3극소자의 동작원리

반도체3극소자를 동작시키려면 소자가 pnp형인가, npn형인가에 관계없이 늘 방사극이음층에는 바른방향으로, 수전극이음층에는 거꿀방향으로 직류전압을 걸어준다.(그림 7-56)

방사극이음층에는 낮은 전압을 걸어주고 수전극이음층에는 높은 전압을 거꾸로 걸어준다.

반도체3극소자에서 전자들의 움직임을 어떻게 조절하겠는가.

방사극을 수전극전원 $E_{수}$와 기초극전원 $E_{기}$의 공동이음점에 련결한 회로(공통방사극회로)를 구성하자.(그림 7-57)

그림 7-56. 반도체 3극소자에서 전류의 흐름방향

수전극전압이 걸려있어도 기초극회로에 있는 스위치가 열려있으면 수전극회로의 전등은 켜지지 않는다.

그것은 기초극층에 수전극쪽으로(+전압이 걸려있다.) 끌려갈수 있는 기본전기나르개(전자)가 없기때문이다.

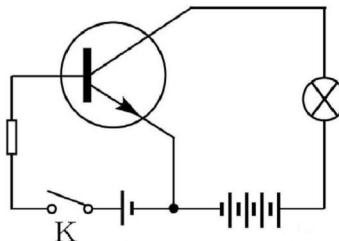



그림 7-57. 방사극이음층에 전압이 걸리지 않으면 수전극전류는 흐르지 않는다

스위치 K를 닫으면 수전극회로의 전등이 켜진다. 이것은 방사극이음층에 바른방향의 전압이 걸려 방사극층으로부터 기초극층으로 전자들이 넘어간다는것이다.

기초극층이 매우 얇으므로 넘어온 전자의 대다수는 자유로운 이동에 의하여(전압은 p-n이음에만 걸려있다.) 수전극이음층에 가닿고 2~5%의 전자들만이 기초극으로 흐른다.(기초극전류) 수전극이음층에 가닿는 95~98%의 전자는 +전압이 걸려있는 수전극으로 끌려가 수전극전류를 이룬다.

$E_{기}$를 리용하여 방사극이음층에 가한 전압을 변화시키면 기초극전류도 변한다.

이때 기초극전류가 조금만 변해도 수전극전류는 크게 변한다. 이 성질을 리용하여 전압이나 전류 또는 전력을 증폭한다.

반도체 3극소자의 증폭작용

반도체3극소자에서 기초극전류가 작게 변할 때 수전극전류가 크게 달라지는 현상을 리용하여보자.

○ 그림 7-58과 같은 전자회로를 구성하고 기초극전압을 변화시키면서 기초극전류와 수전극전류를 측정하여 표에 적어넣자. 기초극전압을 높이면 기초극전류가 커지고 이에 따라 수전극전류가 많이 흐른다.

○ 실험에서 $U_{기}$에 따르는 $I_{기}$와 $I_{수}$를 측정하여 그라프를 그리자.(그림 7-59)

$U_{기}$[V]	$I_{기}$[μA]	$I_{수}$[mA]
0.6	0	0
0.65	25	1.95
0.7	50	4
0.75	75	6.1
0.77	100	7.5
0.79	125	7.65
0.82	175	7.7

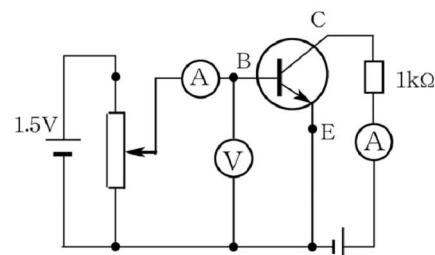



그림 7-58. 증폭회로

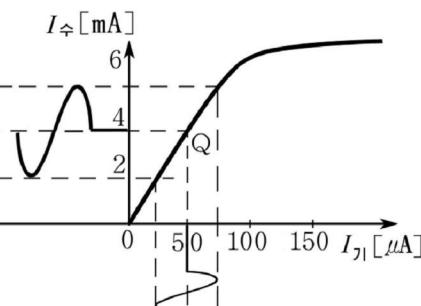



그림 7-59. I기 - I수 특성그라프

수전극전류와 기초극전류의 비 $\beta = \dfrac{I_{수}}{I_{기}}$ 를 **전류증폭결수**라고 부르는데 그 값은 수십정도이다.

기초극에 직류전압 $E_{기}$와 함께 변하는 전압이 걸린다고 하자.

기초극편기전류를 주는 전원 $E_{기}$만이 걸리면 특성곡선우에 동작점 Q가 정해지고 이때 수전극회로에는 일정한 수전극전류 $I_{수}$=4mA가 흐른다.

기초극에 0.7V의 직류전압과 진폭이 0.05V인 교류전압이 함께 걸려있어 기초극전류가 25μA의 진폭으로 변한다고 하자. 이때 기초극전압은 0.65V와 0.75V사이에서 변한다.

이에 따라 수전극전류는 일정한 직류선분 I_0=4mA를 중심으로 약 2mA의 진폭으로 변한다.(표에서는 1.95mA와 6.1mA의 범위에서 변한다.)

이때 교류성분에 의한 부하저항에서의 전압강하 $U_{출}$=2mA×1kΩ=2V가 증폭된 출구전압이다. 입구전압이 0.1V일 때 출구전압은 2V로 증폭된다. 따라서 증폭결수는 K=2/0.1=20이다.

어떤 전자기구들에서 반도체3극소자를 찾아볼수 있는가.

반도체3극소자는 전자기증폭과 발진에 리용된다. 즉 과학실험기구, 공장의 전자설비들과 가정용기구들의 여러가지 전자회로들에는 항상 반도체3극소자가 있다.

반도체전자요소들은 전자관에 비하여 여러가지 우점을 가지고있다. 우선 가열음

극이 없으므로 전력소비가 적고 효률은 50%까지 된다.(전자관에서는 효률이 1%미만이다.)

또한 전원전압이 낮고 크기가 매우 작다.

이 기구에서는 진공을 만들 필요가 없으며 스위치를 넣으면 즉시 동작한다.

반도체요소들의 부족점은 온도에 따라 특성이 지나치게 민감하게 변화되는것이다. 그러므로 반도체기구들을 다룰 때에는 과전압을 주지 않도록 주의하여야 한다.

문 제

1. pnp형3극소자의 동작과정을 전자들의 이동으로 설명하여라.
2. npn형3극소자와 pnp형소자의 동작원리에서 차이점은 무엇인가?
3. 3극소자의 증폭작용은 어떤 원리에 기초하고있는가?

자료 마당효과 3 극소자

기본전기나르개의 작용을 리용한 3극소자로서 두 전극(원천극과 배출극)사이의 전류통로에서 조종극으로 전류의 세기를 조종하는 3극소자를 **마당효과3극소자**라고 부른다.(그림 7-60)

그림 7-60. 마당효과3극소자

마당효과3극소자의 동작과정을 보자.(그림 7-61)

회로에서 스위치의 역할은 조종전압이 한다.

전원전압이 일정할 때 전류의 세기는 통로의 저항에만 관계된다. 즉 가로자름면의 면적에 관계된다.

통로의 가로자름면은 일정하지 않으며 p-n이음에 가해지는 조종전압에 따라 다르다.

즉 조종극에 걸리는 전극의 부호와 전압의 크기에 따라 p-n이음의 부분이 커지거나 작아지면서 통로의 자름면적이 작아지거나 커진다. 따라서 소자를 거치는 전류의 세기가 변한다. 이러한 특성으로 하여 마당효과3극소자는 전기신호의 증폭을 비롯한 여러 부문에 널리 리용된다.

R

− +

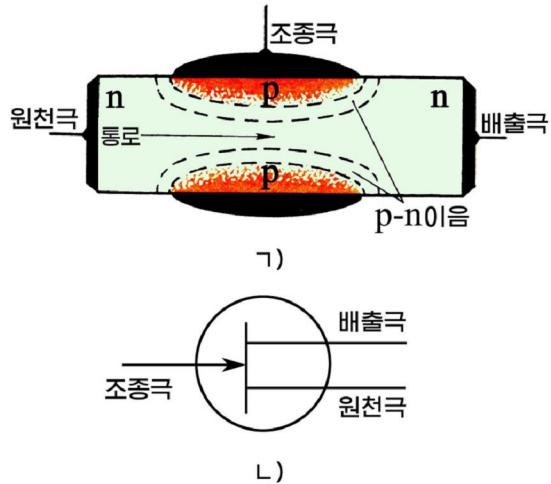
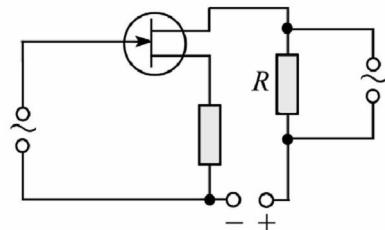



그림 7-61. 마당효과 3극소자의 동작과정

제 13 절. 반도체빛전지와 열전지

빛 전 지

전지에는 건전지, 축전지와 같은 화학전지와 함께 전자수산기에서와 같이 빛에네르기를 직접 전기에네르기로 바꾸는 빛전지도 있다.

그러면 빛에 의하여 어떻게 전동력이 생기는가를 알아보자.

○ 빛전지에 전류계를 련결하고 태양빛을 직접 쪼이면서 전류계의 바늘이 움직인 정도를 알아본다.(그림 7-62) 바늘이 세게 움직인다.

○ 그늘진 곳에 가져갈 때 바늘이 움직인 정도를 알아본다. 바늘이 약하게 움직인다.

○ 빛전지를 불투명체로 완전히 막으면 어떻게 되는가를 살펴본다. 바늘이 움직이지 않는다.

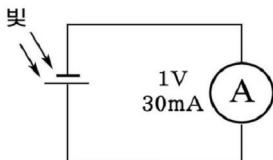
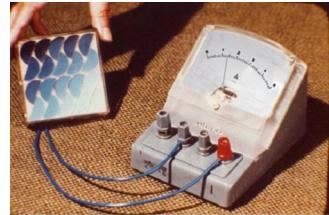



그림 7-62. 빛을 받으면 전류가 흐른다

빛에 의하여 빛전지에는 전동력이 생기므로 회로에 전류가 흐른다.

빛전지는 어떤 구조를 가지고있는가.

빛전지에는 여러가지가 있는데 여기서는 규소단결정빛전지를 보기로 하자.(그림 7-63)

n형규소반도체의 얇은 판의 한쪽에 붕소원자들이 퍼지게 하여 0.3～1μm정도의 두께를 가진 p형반도체층을 만든다.

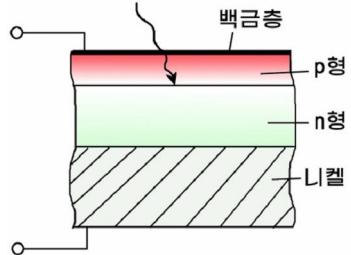
그우에 빛이 투과할수 있는 정도로 얇게 백금층을 입히고 그것의 한 부분에서 전극을 뽑아낸다.

그림 7-63. 빛전지의 구조

n형규소반도체의 뒤면에 은이나 니켈을 증착하고 전극을 련결한다. 이처럼 빛의 작용을 받을수 있도록 만든 하나의 p-n이음이 빛전지이다.

빛전지의 p-n이음에서 어떻게 전동력이 생기는가.

빛전지내부에는 반도체2극소자에서처럼 n형쪽이 ＋, p형쪽이 －로 된 접촉전위차에 의한 전기마당이 있다.

빛전지의 p-n이음에 빛을 쪼이면 내부빛전기효과에 의하여 반도체2극소자에서처럼 기본전기나르개들이 많아지면서 n형에서 p형으로 전자가 퍼지고 p형에서 n형

으로 구멍이 퍼져 p-n이음에는 접촉전위차에 의한 내부전기마당이 생긴다.

p형쪽에 빛을 쪼이면 반도체층이 매우 얇으므로 빛이 흡수되여 전자-구멍쌍을 만들며 이때 생긴 전자는 접촉전기마당에 의하여 n형쪽으로 이동하며 p형쪽에는 구멍이 남아있게 된다.

외부회로를 이으면 전자는 n형에서 p형쪽으로 즉 전류는 +극인 p형반도체로부터 −극인 n형반도체에로 외부회로를 거쳐 전류가 흐른다.

이러한 빛전지는 빛이 작용하는 시간에는 전기에네르기를 만들며 빛이 작용하지 않으면 전기나르개들이 평형상태를 이루어 전류가 흐르지 않는다.

빛전지를 어디에 쓰겠는가.

빛전지는 빛에네르기를 전기에네르기로 변환시키는 전자기구이므로 그 리용분야가 매우 다양하고 전망이 매우 크다.

빛전지는 인공위성이나 우주비행선의 전원으로 쓰인다.

통신위성이나 기상관측위성은 수년간이나 봉사해야 하는데 화학전지로 전원을 보장하는것은 어려우므로 태양에네르기가 기본원천으로 쓰인다.

빛전지는 무인등대나 무인통신중계소들에도 쓰이며 전자수산기와 같이 전력을 적게 쓰는 전자기구들에도 쓰인다.

21세기에 들어와 석탄, 원유와 같은 화석연료가 부족되고 원자에네르기원료가 고갈되며 이산화탄소에 의한 지구생태환경의 파괴를 막기 위하여 재생에네르기, 태양에네르기를 리용하기 위한 연구사업이 적극적으로 진행되고있다.

빛전지를 여러개 결합시킨 빛전지묶음은 자동차의 운행, 가정용전기공급 등에 리용되기 시작하였다.(그림 7-64)

빛전지들은 조도계와 같은 빛특성량측정수단의 원리로 된다.

그림 7-64. 빛전지

열전지

반도체의 전기적특성은 열의 작용에도 매우 예민하다.

MnO_3, NiO_3, CuO와 같은 금속산화물반도체들의 저항이 온도에 따라 변하는 성질을 리용하여 열저항을 만든다.

종류가 다른 두 금속의 접촉점에서는 열전동력이 생긴다.

반도체에서는 이런 현상이 나타나지 않겠는가.

n형반도체와 p형반도체의 한끝은 금속판에 붙이고 전류계를 거쳐 닫긴회로를 만들자.

금속판을 덥히면 전류가 흐른다.(그림 7-65)

전류가 흐르는 까닭은 무엇인가.

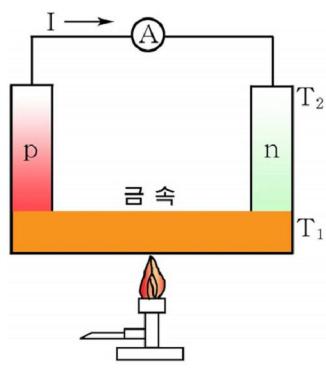



그림 7-65. 열전지

n형반도체와 p형반도체의 뜨거운 끝에 생긴 전자와 구멍이 찬 끝으로 퍼져나간 결과 반도체의 두끝에는 전위차가 생긴다. 회로를 닫으면 이 전위차가 한 방향으로 합쳐지므로 전위차의 합만 한 열전동력이 생긴다. 이것이 반도체열전지의 원리이다.

반도체열전지는 금속의 열전류에 비하여 효률이 높으므로 원자로나 화산, 온천지대에서 버리는 열을 리용하여 전기에네르기를 얻는데서 중요하게 쓰이며 이에 대한 연구를 많이 진행하고있다.

문제

1. 빛전지에서 일어나는 빛전기효과와 빛전자관에서 일어나는 빛전기효과의 다른 점은 무엇인가?
2. 반도체열전지의 작용원리를 전기나르개로 설명하여라.
3. 반도체빛전지와 열전지의 리용실례를 찾아보아라.

자료 금속산화물빛전지

빛전지의 모양이 다양해지고있으며 그 효률을 높이기 위한 연구사업이 계속되고있다.

아직도 빛전지의 효률은 수십% 수준을 넘지 못하고있다.

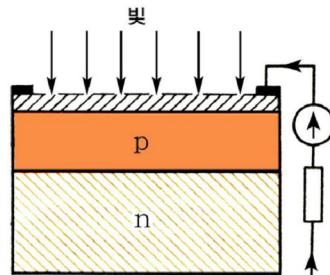
금속과 그 산화물로 빛전지를 만들수 있다.

빛전지는 금속과 그 산화물을 접속시킨 판의 한쪽에 매우 얇은 투명한 금층을 증착시켰다.

금속과 그 산화물경계는 p-n이음으로 된다. 즉 전자들은 금속으로부터 산화물로, 구멍은 산화물로부터 금속으로 이동한다. 빛이 작용할 때 전자와 구멍의 수는 증가하며 외부회로의 저항을 거쳐 주어진 한 방향으로 흐르는 전류가 생긴다.

그림 7-66. 금속산화물빛전지

최근에는 식물의 빛흡수작용원리에 기초한 빛전지가 개발되였고 그것을 실용화하기 위한 연구가 실천단계에 들어갔다.

탐구

문제. 액체질소속에 금속을 넣은 경우와 반도체를 넣은 경우에 작은 전등의 밝기가 어떻게 변하며 왜 그런가를 알아보아라.

방향. · 가는 동선을 수백회 감은 선륜과 반도체발광소자(혹은 열저항)에 작은 전등, 전류계, 전지를 련결한다.
· 높은 온도, 보통온도에서 전류의 세기, 작은 전등의 밝기를 비교한다.
· 얼음물속에서, 액체질소속에서 전류의 세기, 작은 전등의 밝기를 비교한다.

복습문제

그림 7-67

1. 직4각형의 금속판이 가속도 $\vec{a}$로 면에 수직인 방향으로 운동한다.(그림 7-67) 판의 운동에 의하여 생기는 전기마당의 세기를 구하여라. 그리고 운동방향에 수직인 면에서 전기량의 겉면밀도를 구하여라. (답. $-\frac{m}{e}\vec{a}$, $\varepsilon_0 \frac{m}{e} a$)

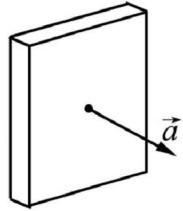



그림 7-68

2. 저항이 $R=10^3\Omega$인 저항기를 거쳐 극판사이의 거리가 d=3mm이고 전기용량이 $C=10^{-11}$F인 축전기를 고압전원에 련결하였다. 극판사이에 있는 공간에서 공기가 렌트겐선에 의하여 이온화되는데 1cm^3속에서 1s당 이온쌍이 $n=10^4$개가 생긴다.(그림 7-68)
매 이온의 전기량은 전자의 전기량과 같다. 매 이온들이 재결합함이 없이 축전기의 극판에 도달한다고 보고 저항 R에서의 전압강하를 구하여라.
(답. 3.2×10^{-11}V)
3. 반경이 R인 금속원기둥이 일정한 각속도 ω로 돌아간다. 원기둥축가까이의 거리 R에 대한 전기마당의 세기의 관계를 구하여라. 원기둥의 겉면과 축사이의 전위차는 얼마인가?
4. 반경이 R=25m인 금속원판이 돌아갈 때 판의 축과 모서리사이의 전위차를 알려면 얼마의 회전수로 돌려야 하는가? 검류계의 감도는 한 눈금당 $U=10^{-5}$V이고 전자의 비전기량은 $\frac{e}{m}=1.76\times10^{11}$C/kg이다. (답. 11.9s^{-1})
5. 전등의 한 극에 동선을 련결하고 다른 극에 알루미니움선을 련결하였다. 도선들의 직경은 같다. 매 원자에서 하나의 전도전자가 생긴다고 보고 두 도선에서의 전자들의 질서있는 운동속도의 비를 구하여라. 알루미니움과 동의 밀도는 각각 $2.7\times10^3\text{kg/m}^3$와 $8.9\times10^3\text{kg/m}^3$이고 그것들의 원자량은 27과 64이다.
(답. $\frac{v_{알}}{v_{동}}=1.4$)

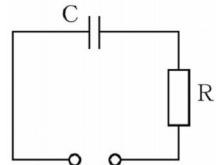
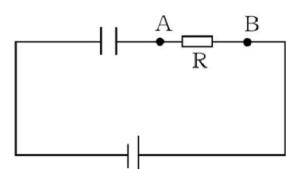
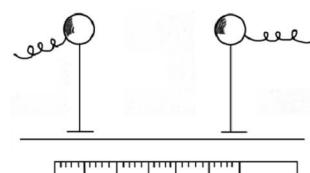



그림 7-69

6. 평판축전기를 저항과 직렬로 련결한 전기회로에서 축전기극판사이로 방사선이 지나가면서 1s당 10^4개의 1가이온쌍을 만든다. 전원은 회로에 충분한 전압을 걸어준다. 여기서 $R=10^3\Omega$, 극판사이의 전압은 U=300V이다. 전원의 내부저항이 $R=10\Omega$이면 전원의 전동력은 얼마인가?(그림 7-69)
(답. 약 300V)

7. 표준대기압에서 전자가 중성인 공기분자와 충돌할 때까지 갈수 있는 거리는 0.005mm이다. 공기분자의 이온화에네르기가 24×10^{-19}J이라면 공기속에서 독립방전이 일어날수 있는 전기마당의 세기는 얼마인가?

(답. 3×10^{6}V/m)

8. 평판축전기의 두 극판들사이의 공기가 외부작용에 의하여 이온화되고있다. 평판의 면적은 100cm^2이고 그들사이의 거리는 0.5cm이다. 두 평판사이에 2×10^{-10}A의 포화전류가 흐르고있다. 1s동안에 공기 1cm^3 속에서 생기는 전자의 수를 구하여라. 한개 분자에서 전자는 하나씩 떨어져나온다.

(답. 1.25×10^{7}개)

9. 기체압력이 낮으면 외부작용이 없어도 방전은 잘 일어난다. 왜 그런가?

10. 방전할 때 빛을 내쏘므로 에네르기가 점차 줄어들어 나중에는 방전이 멎지 않겠는가?

11. 음극선이 대전립자의 흐름이라는것을 어떤 실험으로 알수 있는가?

12. 대기압에서 일어나는 방전들을 비교하여볼수 있도록 표에 해당한 내용을 써넣어라.

방전형태 / 특 성			
방전전압			
전기나르개가 생기는 과정			
겉보기특징			
소리와 빛			

13. 칼날스위치를 넣을 때와 뽑을 때 어떤 방전이 일어나는가? 왜 그런가?

14. 어떤 고압장치의 전압을 두 방전구사이의 거리로 잰다. 이 원리는 무엇인가?(그림 7-70)

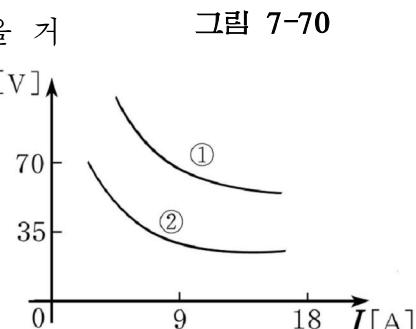
그림 7-70

15. 호광방전이 일어날 때 두 전극사이의 전압과 불길을 거쳐 흐르는 전류의 세기사이의 관계(전류-전압 특성곡선)는 그림 7-71과 같다.

ㄱ) 전류의 세기가 커지면 전압이 줄어드는것은 무엇때문인가?

ㄴ) 곡선 ①과 ②는 어떤 차이에 의하여 생긴것인가?

그림 7-71

16. 직경이 1mm인 동선에 1A의 전류가 흐를 때 전자의 평균이동속도는 얼마인가? 동원자 1개에서 1개의 전자가 자유전자로 되였다고 보아라. (답. 9.5×10^{-5} m/s)

17. 결정속의 전자가 가지는 자리에네르기를 직각우물이라고 보고 다음 물음에 대답하여라.

ㄱ) 파울리의 원리에 의하면 전자가 어느 준위까지 갈수 있는가? 전자의 개수는 N이다.

ㄴ) 가장 큰 에네르기를 가진 전자를 결정에서 떼여내려면 얼마만한 일을 하여야 하는가?

18. 에네르기띠속의 준위사이의 간격은 원자사이의 간격이 좁아지면 커진다. 그리하여 에네르기띠가 넓어진다. 왜 그런가? 직각우물모양의 자리에네르기경우에 ℓ이 작아질 때 준위사이의 간격이 어떻게 되는가를 따져보아라.

19. 도체, 반도체, 부도체의 에네르기띠의 모양은 어떠한가? 어떤 경우에 도체, 부도체, 반도체의 성질을 나타내는가?

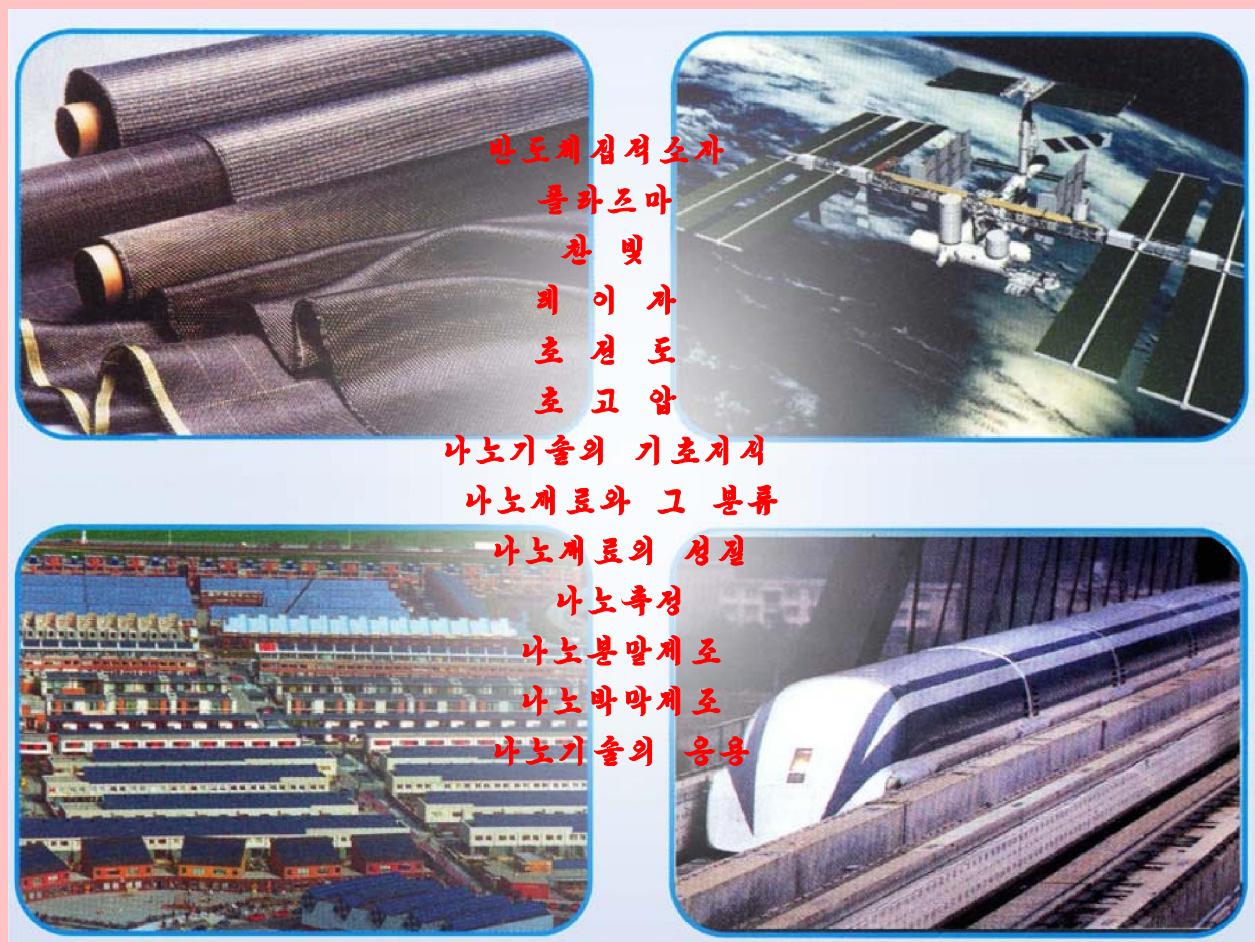
20. Ge반도체에 혼입물을 넣을 때 이온의 전기량이 가리워지면서 전기마당의 세기가 1/16로 줄어든다면 주개나 받개의 준위는 어디에 생기는가?

21. 온도가 높아지면 도체의 전기저항은 커지는데 반도체의 전기저항은 작아지는 원인은 무엇인가?

22. 구멍의 수밀도(단위체적당 구멍의 수)가 $n_{In}=10^{22}m^{-3}$이 되도록 하기 위하여 게르마니움에 몇%의 인디움을 넣어야 하는가? 게르마니움속에서 비기본전기나르개들의 수밀도는 무시할수 있도록 작다. 인디움의 몰질량은 $\mu_{In}=0.115$kg/mol이며 게르마니움의 밀도는 $\rho_{Ge}=5\ 400$kg/m^{3}이다.

(답. 3.5×10^{-5}%)

23. 게르마니움이나 규소에 석을 녹여 넣으면 p-n이음을 얻을수 있겠는가?

24. 여러가지 매질속의 전류들에서 전기나르개의 종류와 밀도, 그 특성량들을 찾아 표에 써넣고 차이점을 밝혀라.

제 8 장. 물리학의 최신성과, 나노기술의 기초

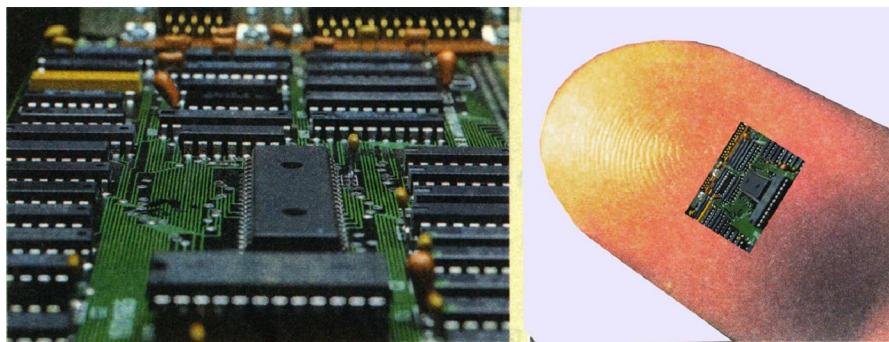
과학과 기술의 급속한 발전은 여러차례의 과학기술적변혁을 일으켜 정보산업의 시대를 열어놓았다.

물리학은 보다 완성된 정보처리수단을 만드는 문제, 긴장한 에네르기를 해결하고 새로운 특성을 가진 재료를 얻는 문제 등에서 큰 성과를 이룩하였다.

특히 초고압이나 극저온, 초고온과 같은 극한상태에서의 물질의 성질을 연구하는 분야들이 생겨났으며 레이자물질과 플라즈마, 초전도체와 나노재료와 같은 특이한 성질을 가진 물질들의 모임상태에 대한 연구에서도 큰 전진이 이룩되였다.

이 장에서는 집적소자의 제작과정과 극한상태인 고온, 초고압, 극저온에서 물질들의 특성을 연구하고 나노기술에 대하여 초보적으로 학습한다.

제 1절. 반도체집적소자

과학과 기술수단이 발전함에 따라 하나의 반도체결정안에 여러개의 반도체소자들과 저항, 축전기와 같은 요소들을 만들어넣을수 있게 되였다. 이처럼 일정한 기능을 수행할수 있는 전자회로전체를 하나의 반도체결정안에 넣어 만든 전자요소를 **집적소자**(IC)라고 부른다.

집적소자의 발명과 콤퓨터의 발전

집적소자의 발명은 최첨단과학의 시초를 열어놓았으며 정보산업시대의 정보처리수단으로 극소형콤퓨터를 만들수 있게 하였다.

1946년에 처음으로 제작된 1세대콤퓨터인 전자관식대형콤퓨터(질량이 30t, 1만 8천개의 전자관)는 반도체소자가 나옴으로써 그 체적이 천분의 일이고 수명과 효률이 백배이상 커진 2세대콤퓨터로 개조되였으며 1964년에는 집적소자로 만든 3세대콤퓨터로 개조되였다.

1980년에는 백만여개의 요소를 집적화한 초대규모의 집적소자가 나와 $1mm^2$의 규소판우에 60여만개의 요소를 넣을수 있게 되여 콤퓨터는 극소형화되고 정보처리능력이 1s당 수십억회로 늘어났다.

집적소자의 집적도는 해마다 거의 2배씩 높아지고있으므로 초대규모집적소자가 만들어져 보다 능률적이고 소형화된 콤퓨터와 TV, 로보트와 각종 전자수단들이 개발되고있다.(그림 8-1)

콤퓨터안의 집적소자들　　　　크기가 작은 집적소자

그림 8-1. 집적소자

집적소자의 제작과정

집적소자는 규소반도체단결정안에 일정한 기능을 수행하는 전자회로의 지정된

자리에 혼입물을 넣어 반도체2극소자와 반도체 3극소자, 저항과 축전기를 만들고 련결선으로 이어놓은것이다.(그림 8-2)

집적소자를 제작하려면 우선 질좋은 단결정을 성장시키고 그것을 일정한 방향으로 절단하여 소자의 바탕으로 되는 얇은 단결정판을 준비하고 산화, 확산, 부식공정들을 거쳐야 한다.

가장 간단한 집적소자의 한 부분을 만드는 실례를 보자.

p형Si반도체단결정판의 겉면을 연마하고 겉면에 산화규소(SiO_2)를 입혀 절연시킨다.(그림 ㄱ)

전자회로의 필요한 자리(A, B, C)에 산화피막을 벗기고 n형혼입물을 넣는다.(그림 ㄴ)

이것을 다시 산화피막을 입혀 절연시키고 A, B의 보다 작은 자리만을 벗기고 p형혼입물을 넣는다.(그림 ㄷ)

같은 방법으로 다시 A자리에만 n형혼입물을 넣으면 A자리에는 npn층이 생기고 B자리에는 np층, C자리에는 n층이 생기게 된다.(그림 ㄹ)

ㄱ) 산화

ㄴ) 부식, 확산

ㄷ) 산화, 확산

ㄹ) 산화, 확산

ㅁ) 산화, 증착

그림 8-2. 집적소자제작과정

바탕단결정판의 겉면에 SiO_2피막을 입히고 전극들을 붙일 자리에 구멍을 내고 전극들을 겉면에 증착시킨 금속띠로 이어 회로를 완성한다.(그림 ㅁ)

이때 A자리는 npn형3극소자, B자리는 저항, C자리는 축전기로 된다.

이처럼 집적소자는 여러개의 요소들이 하나의 블로크를 이루도록 밀착되여있으므로 개별적요소들의 작용을 따로 살펴볼수 없다.

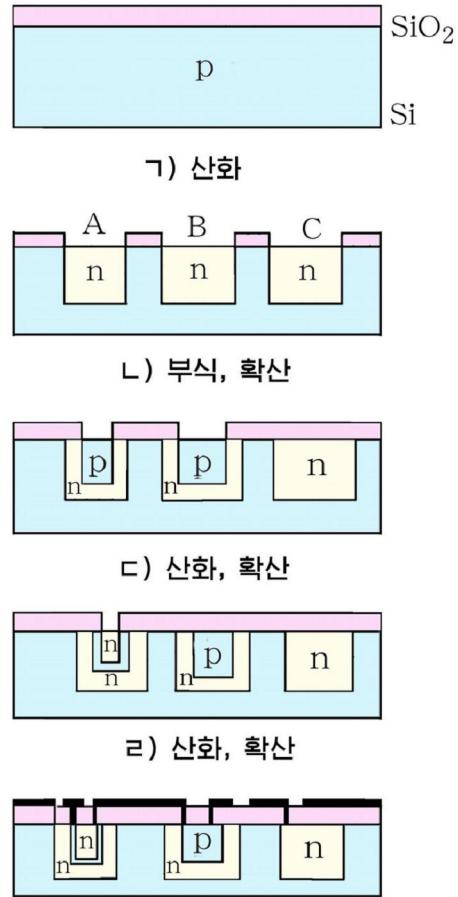
실례로 콤퓨터에서 쓰이는 중앙처리소자(CPU)와 TV의 영상증폭소자들은 고유한 회로적기능을 가지고있으므로 다른 소자들을 대신할수 없다.

집적소자는 매 요소들의 동작이 안전하게 수행되도록 제작후 밀봉하므로 바깥으로는 입출구다리와 전원다리가 나와있을뿐이다.

집적소자의 우점

첫째로, 전자요소들을 높은 밀도로 집적시켰으므로 전자장치들이 작고 가벼우며 성능이 높다.

둘째로, 수많은 요소들이 이음점이 없이 밀착되여있으므로 집적소자동작의 믿음성이 크다.

셋째로, 매 집적소자들이 전용기능을 담당하고있으므로 회로구성이 편리하고 간단하다.

넷째로, 집적소자들의 체적이 작고 소비전력이 수천분의 1W정도이므로 제작된 기구들이 매우 경제적이다.

현재 쓰이는 주머니용전자수산기와 같은 계산능력을 가진 수산기를 전자관으로 만든다면 소비전력이 하나의 전기로와 맞먹는다.

집적소자는 그 우월성으로 하여 콤퓨터, 각종 자동화장치, 자동조종, 라지오, TV, 각종 전자측정장치 등과 어린이완구들에까지 널리 쓰이고있다.

집적소자의 발전에 따라 오늘에 와서는 추리, 판단의 기능을 가지며 말을 알아차리는 기능을 가진 지능화된 콤퓨터뇌수에 대한 연구가 진행되고있다.

사람의 두뇌를 대신할수 있는 콤퓨터뇌수는 약 10^{10}개의 회로요소가 들어가야 한다.

문 제

1. 그림 8-3과 같은 간단한 회로를 집적화하려면 어떤 공정을 거쳐야 하는가?
2. TV에 쓰이는 집적소자를 찾아보고 그 우점을 설명하여라.
3. 못쓰게 된 간단한 집적소자의 구조를 확대경으로 보면서 회로를 그려보아라.

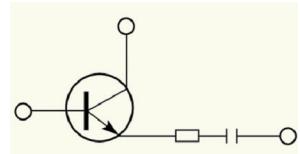



그림 8-3

제 2 절. 플라즈마

충분히 낮은 온도에서 모든 물질은 고체상태에 있다.

이것을 가열하면 물체는 고체상태로부터 액체상태로 그다음에는 기체상태로 된다.

기체를 더 가열하면 어떻게 되겠는가.

기체를 가열하면 기체분자와 원자들이 더 빠른 속도로 운동하게 되며 그 과정에 서로 충돌하여 이온으로 된다. 부분적으로 혹은 완전히 이온화되고 전체로는 중성상태인 새로운 네번째 상태의 물질을 **플라즈마**라고 부른다.

플라즈마상태

플라즈마는 부분적으로 혹은 완전히 이온화되여있지만 +전기량과 –전기량의 밀도가 같아서 전체적으로는 중성상태이다.

립자들의 총밀도에 대한 이온화된 립자들의 밀도의 비를 **이온화도**(α)라고 부른다.

플라즈마를 이온화도에 따라 분류하면 다음과 같다.

α가 1%미만인것을 **약하게 이온화된 플라즈마**라고 부르며 수%정도인것을 **부분적으로 이온화된 플라즈마**, 100%에 가까운것을 **완전히 이온화된 플라즈마**라고 부른다.(그림 8-4)

그림 8-4. 수소의 이온화도

약하게 이온화된 플라즈마의 실례는 자연계에서 대기의 웃층에 있는 이온층을 들수 있다. 이온층은 지구를 둘러싼 대기층이 100∼300km이상의 높이에서 우주공간으로부터 오는 방사선의 작용으로 이온화되여 생긴 대기층이다. 태양과 별들 혹은 별구름들은 높은 온도에서 완전히 이온화된 플라즈마이다.

우주공간에서 오는 양성자와 전자가 지구자기마당속으로 들어올 때 지구자기마당의 작용을 받아 극부분에 모여들면서 공기를 이온화시켜 빛을 내게 한다. 이것이 **극광**현상이다.(그림 8-5)

그림 8-5. 극 광

플라즈마는 일반적으로 그것의 온도에 따라 저온플라즈마와 고온플라즈마로 나눈다.

저온플라즈마는 온도가 10^5K보다 낮은 플라즈마를 의미하며 고온플라즈마는 온도가 10^6∼10^8K정도인 플라즈마를 말한다.

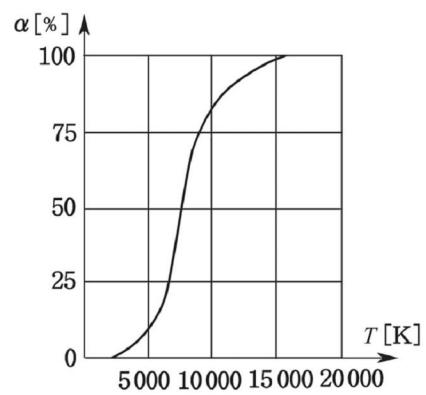
※ 이러한 분류는 조건적인데 고온플라즈마가 태양의 활동연구에서와 열핵조종반응의 실현과 관련하여 특별히 중요하기때문에 정한것이다.

플라즈마의 성질

플라즈마는 쉽게 움직일수 있는 전자와 이온으로 이루어져있으므로 전기마당이 걸리면 센 전류가 흐른다. 높은 온도에서 완전히 이온화된 플라즈마의 전기전도도는 초전도에 가까와진다.

중성인 기체분자들사이에는 짧은 거리에서만 나타나는 힘이 작용하지만 플라즈마는 대전립자들로 이루어져있으므로 그것들사이에는 먼거리에서도 꿀롱힘이 작용한다.

그러므로 기체분자들은 이웃분자들과만 호상작용하지만 플라즈마립자들은 주위에 있는 많은 립자들과 동시에 작용하므로 무질서한 열운동과 함께 질서있는 집단적인 움직임을 나타낸다. 이러한 호상작용에 의하여 플라즈마에서는 여러 종류의 진동과 파동이 쉽게 생긴다.

플라즈마에 전류가 흐르면 자체로 조여드는 효과(핀치효과)가 나타난다. 원기둥

모양의 플라즈마에 전류가 흐를 때 전류는 자기마당을 만들고 이 마당이 전류에 힘을 주어 자체로 조여들게 한다.(그림 8-6) 이것은 같은 방향으로 흐르는 전류가 서로 끌어당기는것과 같은 리치이다.

불꽃방전이나 번개에서 생기는 플라즈마줄기에서도 이 효과가 나타난다.

그림 8-6. 핀치효과

플라즈마의 존재

기체속에서 일어나는 모든 형식의 방전에서 기체방전플라즈마가 형성된다.

별과 별의 대기, 은하계와 별사이물질 등 우주의 절대다수는 플라즈마상태(약 99%)에 있다. 별사이물질의 밀도는 매우 작은데 평균적으로 $1cm^3$에 원자 1개도 놓이지 않는다. 이러한 별사이물질원자들은 우주공간을 빠른 속도로 통과하는 흐름인 별의 복사선과 우주선에 의하여 이온화된다.

별사이물질의 플라즈마의 온도는 별의 가열된 플라즈마와는 달리 온도가 매우 낮다. 지구주위에서 플라즈마는 지구방사대와 이온층을 형성하면서 지구자기마당을 채우는 태양바람형태로 우주에 존재한다.

지구가까이에 있는 플라즈마에서 일어나는 이상과정에 의하여 자기폭풍과 극광이 발생한다.

금속에 있는 자유전자들은 플라즈마를 특징짓는 많은 성질들을 가지고있다.(고체플라즈마) 보통플라즈마와 달리 고체플라즈마에서는 양이온들이 전체 고체에서 운동하지 못하고 자유전자들만이 운동한다.

고체플라즈마의 다른 특성은 방안온도나 절대령도가까이의 낮은 온도에서도 그것이 존재할수 있다는것이다.

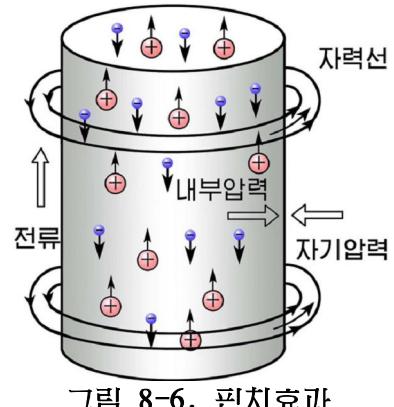
플라즈마의 리용

플라즈마는 우주에 널리 퍼져있지만 우리 주위 가까이에서는 찾아보기가 쉽지 않다.

저온플라즈마($T \approx 10^3$K)는 기체방전판에서 많이 쓰인다. 최근에 쓰이는 기체방전등은 형광등에서와 같이 2차물질의 발광을 리용하지 않고 매질플라즈마의 방전을 직접 리용한다. 이러한 매질로는 태양빛에 가까운 빛을 내는것을 선택한다.

기체방전플라즈마는 기체레이자기구들에 널리 응용된다.

호광방전을 일으켜 센 플라즈마흐름을 내보내는 기구를 **플라즈마트론**이라고 부른다.

플라즈마트론에서 나오는 플라즈마흐름의 에네르기밀도는 $10^6 W/cm^2$정도이고 흐름이 매우 빠르다. 그러므로 이 흐름을 쓰면 월프람, 몰리브덴과 같은 잘 녹지 않

는 금속을 비롯하여 내화벽돌, 화강석과 같은 비금속재료들까지 빠르고 정확히 자를수 있다.

플라즈마를 쓰면 구멍뚫기, 홈따기, 걸면연마와 같은 여러가지 가공처리를 쉽게 할수 있다. 또한 플라즈마를 쓰면 여러가지 재료의 가루를 소재걸면에 녹여붙일수 있어 치밀한 막을 얻을수 있다.

플라즈마를 쓰면 두께가 1mm 보다 얇은 판도 용접할수 있다.(그림 8-7)

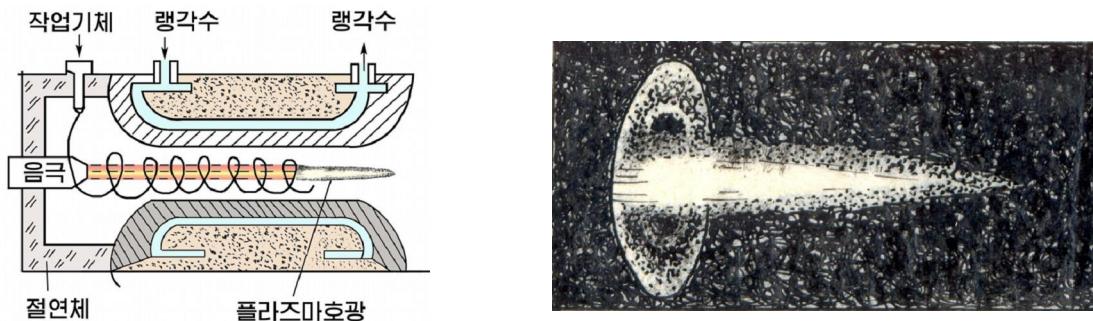



그림 8-7. 플라즈마트론의 원리와 플라즈마트론에서 나오는 플라즈마불길

기체방전플라즈마는 센 빛을 내는 기체레이자에 쓰인다.

플라즈마는 보통조건에서 실현하기 힘든 반응들도 진행할수 있으므로 화학반응에도 널리 쓰인다. 최근에는 고온플라즈마를 리용하여 조종열핵반응을 실현하기 위한 연구사업이 추진되고있다.(그림 8-8)

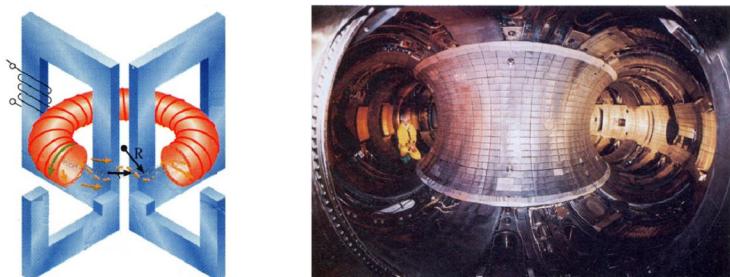



그림 8-8. 도까마크

플 라 즈 마 발 전 기

저온플라즈마는 열에네르기를 직접 전기에네르기로 바꾸는 플라즈마발전기(자기류체력학식발전기)에 응용된다. 자기마당을 거쳐 플라즈마줄기가 지나갈 때 플라즈마속에 있는 서로 다른 부호의 대전립자들이 분리되며 이에 따라 두 전극에는 전위차가 생긴다.

두 전극에 생긴 전압은 외부회로에 공급된다. 자기류체력학식발전기는 가역기관이다.

만일 외부전원에서 전극에 전압을 걸어주고 자기마당속에 있는 플라즈마를 거쳐 전류가 흐른다면 마당은 플라즈마의 흐름을 가속시킨다. 여기에 전자플라즈마발동기의 작용원리가 있다. 가속(10^5m/s 까지)플라즈마흐름은 큰 반작용력을 만들수 있다.

플라즈마발동기는 앞으로 우주려행에서 중요한 수단으로 쓰이게 될것이다.

1. 플라즈마를 왜 물질의 네번째 상태라고 하는가?
2. 우리 생활에서 플라즈마의 실례를 찾아보아라.
3. 플라즈마를 리용하는 새로운 수단을 생각해보아라.

제 3 절. 찬 빛

찬빛이란 무엇인가

백열전등이 빛을 낼 때 가열선조는 매우 높은 온도로 가열된다.

보통때에는 검실검실하게 보이는 쇠도 가열하면 빛을 낸다.

그렇다면 빛은 뜨겁게 가열된 물체에서만 나오겠는가.

우리가 매일 보는 TV의 화면이나 벽시계의 수자판, 형광등은 빛을 낼 때에도 뜨겁지 않다. 이처럼 온도가 높아짐이 없이 물체가 내는 빛을 **찬빛**이라고 부른다.

물체가 어떤 때에 찬빛을 낼수 있는가.

빛은 여러가지 작용을 받아 물체속의 원자의 에네르기준위가 변할 때 에네르기가 방출되는 현상이다.

백열전등에서 나오는 빛은 전기마당의 에네르기가 가열선조에서 열에네르기로 전환되여 원자에네르기로 넘어간 결과로 생겨난다.

열적작용이 아닌 다른 작용으로도 빛이 방출된다.

TV의 화면은 전자의 충돌에 의하여 찬빛을 내고 형광등에서는 자외선쪼임을 받아 찬빛이 나온다.

찬빛은 외부작용에 따라 빛에 의한 찬빛, 전자선에 의한 찬빛, 렌트겐선에 의한 찬빛, 화학적 및 생물학적작용에 의한 찬빛 등으로 갈라볼수 있다.

이러한 여러가지 찬빛중에서도 빛에 의한 찬빛이 가장 많이 연구되고있으며 실천적으로 널리 쓰인다.

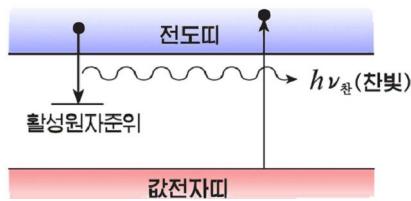
찬빛은 그것을 내는 물질에 따라 외부작용이 가해질 때에 거의 동시에 빛을 내는 **형광**과 외부작용이 없어져도 오래동안 빛을 내는 **린광**으로 나눈다.

찬빛의 원인

찬빛은 여러가지 작용에 의하여 나온다.

찬빛을 내는 원인을 류화아연(ZnS)의 실례를 리용하여 알아보자.(그림 8-9)

그림 8-9. 형광물질의 에네르기준위

류화아연에 은을 조금 넣으면 2가의 Zn자리에 들어간 1가의 Ag는 가까이에 있는 전자를 당겨 결합을 이룬다. 따라서 Ag는 이온처럼 행동하면서 둘레에 구멍을 잡아둔다.

결과 값전자띠우에 빈 준위가 생긴다.

이때 첨가한 은을 **활성원자**라고 부르며 이 준위를 **활성원자준위**라고 부른다.

밖에서 빛을 쪼이거나 전자로 타격하여 에네르기를 주면 활성원자준위나 충만된 값전자띠의 전자가 전도띠로 올라간다. 이때 전도띠에 있던 전자들이 활성원자준위로 내려왔다가 값전자띠로 내려오면서 내보내는것이 찬빛이다.

찬빛의 성질

찬빛은 다같은 특성을 가지는가.

찬빛의 지속성은 린광체와 형광체에서 심히 차이난다.

보통 활성원자는 려기상태에 10^{-8}s정도 머물러있는다.

려기상태의 이러한 지속성은 형광에서 흔히 알수 있다. 실례로 석유에 해빛이 비치면 연한 푸른색의 형광빛이 나오는것을 볼수 있다. 그러나 해빛을 없애면 이러한 형광빛을 볼수 없다.

형광은 주로 액체나 기체에서 일어난다.

우리는 이따금 활성원자의 려기상태가 10^{-4}s로부터 수min까지 상대적으로 길게 유지되는것을 볼수 있다. 이러한 린광은 주로 고체들에서 일어난다. 실례로 류화아연결정가루를 마분지걸면에 바르고 빛을 주다가 끊어버려도 린광은 몇min동안 지속된다.

린광은 전도띠에 올랐던 전자들이 활성원자준위에 떨어진 다음 오래동안 그 상태를 유지하면서 값전자띠로 떨어지지만 형광은 전도띠에 올랐던 전자가 즉시에 값전자띠로 이행하면서 나온 빛이다.

찬빛의 지속성은 활성원자준위의 폭에 관계된다. 그것은 불확정성의 원리에 따라 활성원자준위의 폭이 그 상태에 있을 전자들의 수명을 결정하기때문이다.

※ 에네르기와 시간사이의 불확정성관계식 $\Delta E \cdot \Delta \tau \geq h$

찬빛의 진동수범위와 세기는 찬빛물질의 종류와 외부작용에 따라 다르다.

린광이나 형광의 진동수는 입사한 빛의 진동수와 같은가.

석유는 자외선을 쪼여줄 때 푸른빛을 내며 훌루오레쎄인이라는 물감의 수용액은 가까운자외선과 푸른색빛사이의 빛을 쪼여줄 때 풀색빛을 낸다. 그리고 홍옥은 400nm 근방의 보라색빛과 550nm 근방의 풀색빛을 흡수하여 붉은색빛을 낸다.

찬빛에는 대체로 진동수가 적외선보다 더 작은 선이 거의 없고 진동수가 큰 자외선이상의 선들도 없다. 이것은 찬빛을 내는 전자들의 에네르기준위이행과 관련된다.

값전자띠의 전자들이 전도띠까지 올라가려면 외부작용의 에네르기가 금지띠의 에네르기보다 커야 한다. 올라가는 전자들은 전도띠의 아래준위가 대체로 꽉 차있으므로 보다 높은 준위로 올라가게 되고 떨어지는 전자들은 전도띠의 아래준위에 있던

전자들로서 활성원자준위를 거치게 된다. 때문에 찬빛의 진동수는 그것을 일으킨 빛의 진동수보다 크지 않다. 이것을 **스톡스의 법칙**이라고 부른다. (그림 8-10)

$$h\nu_{찬} = h\nu_{입} - \Delta E$$

여기서 ΔE는 소비된 빛에네르기몫이다.

그림 8-10. 스톡스의 법칙

찬빛의 리용

우선 찬빛은 음극선이나 자외선과 같이 눈에 보이지 않는 작용을 눈에 보이는 빛으로 변화시키는데 쓰인다.

실례로 형광등의 작용을 알아보자. (그림 8-11)

그림 8-11. 형광등에서 찬빛이 나온다

형광등의 안벽에는 형광물질을 입혔다. 형광등속에서 기체방전이 일어나면 가속된 전자가 수은원자에 충돌한다. 그러면 수은원자는 높은 에네르기상태로 되였다가 바닥상태로 돌아오면서 자외선을 낸다. 자외선의 작용을 받은 형광물질은 눈에 보이는 빛을 낸다.

보통백열전등은 에네르기의 수%만이 보임빛선으로 복사된다. 그러나 형광등은 거의나 보임빛선만을 복사한다.

형광등은 보통전등에 비하여 전기소비량이 약 1/4로 되나 한류기를 쓰므로 무효전력을 증대시키는 결함이 있다.

최근에는 콤팍트등을 많이 쓴다.

콤팍트등에서는 발광물질에 희토류원소를 첨가하였으며 한류기와 촉발기의 역할을 전자회로가 수행하도록 하였다.

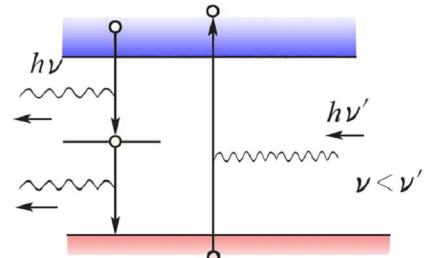
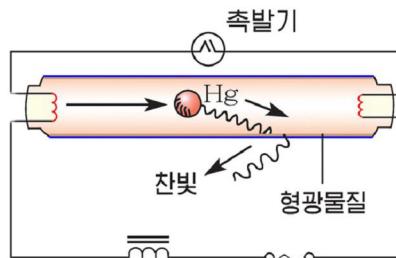
또한 찬빛등은 사람들의 건강증진에 필요한 자외선을 얻는데도 리용된다.

280～315nm의 파장대역에 속하는 중간파장의 자외선은 피부에 작용하여 비타민 D를 형성시키는것과 같은 좋은 효과를 준다.

자외선찬빛등은 자외선을 통과시키는 석영유리로 되여있으며 관의 안벽에 바른것은 짧은파장자외선을 흡수하여 중간파장자외선을 복사하는 린광체인 $Ca_3(PO_4)_2$와 $Zn_3(PO_4)_2$를 기본물질로 하고 여기에 약 5%의 Tl을 혼합한것이다. 복사의 극대는 약 310nm에 놓인다.

또한 찬빛물질은 보이지 않는 자외선과 렌트겐선, 방사선의 관측에 리용된다. 실례로 세시움을 약간 섞어 만든 석영유리에 자외선을 쪼이면 푸른색형광을 내는데 그 세기가 쪼여주는 자외선의 세기에 관계되므로 자외선의 세기도 알아낼수 있다.

렌트겐선관측에는 ZnS와 CdS의 혼합결정에 몇백분의 1%정도의 은이 섞인 린광체를 쓸수 있다.

TV와 콤퓨터, 레이다수상관의 앞벽에는 전자들이 충돌할 때 빛을 내는 린광체

를 쓴다. 그러므로 효률이 높고 필요한 파장의 빛을 내는 찬빛물질을 찾아내는 연구사업은 계속되고있다.

다음으로 찬빛은 연구대상물질의 구성을 정성적으로나 정량적으로 분석하는 기초원리로 된다.

형광스펙트르선의 세기에 따라 매우 작은(1g속에 10^{-11}g정도 들어있는) 혼입물도 알아낼수 있다.

형광분석은 공업의 각이한 부문들과 의학, 생물학 등에서 널리 리용된다.

문 제

1. 형광물질을 리용하여 눈에 보이지 않는 렌트겐선을 눈에 보이는 빛으로 만드는 리치를 례를 들어 설명하여라.
2. 린빛을 내는 물질은 대체로 결정이다. 왜 그런가?
3. 찬빛의 리용실례를 우리 주위에서 찾아보아라.

제 4 절. 레 이 자

빛이 전자기파라면 빛도 증폭할수 있지 않는가.

사람들은 오래전부터 이에 대하여 연구하였으나 보통빛이 가지는 특성으로부터 불가능하다고 보았다.

보통광원에서는 려기준위에 올라간 전자들이 무질서하게 낮은 준위로 떨어지면서 전자기파를 복사하므로 빛은 자리각이 각이한 짤막한 전자기파들의 모임으로 볼수 있다.

이로부터 일정한 자리각차를 오랜 시간동안 보장할수 없으므로 간섭조건을 실현하지 못한다. 1960년 과학자들이 홍보석을 리용하여 레이자빛을 얻음으로써 인류의 꿈은 실현되였고 새로운 발전의 길을 걷게 되였다.

강제복사

보통광원에서 전자들은 려기준위에 있다가도 일정한 시간이 지나면 스스로 떨어지면서 빛을 낸다. 이것을 **자발복사**라고 부른다.

자발복사는 물질속에서 전자들의 무질서한 운동결과이므로 외부에서 조절하기 매우 어렵다.

과학자들은 려기준위에 있는 전자들을 필요할 때에 떨굴수 있는 방도를 알아냈다.

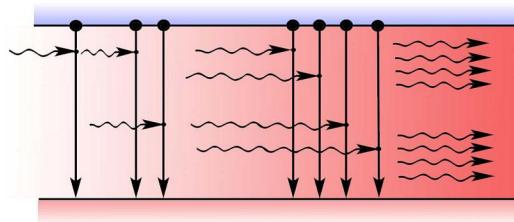
려기된 전자를 가지고있는 물질에 복사할 주파수와 같은 빛을 밖에서 주면 전자는 아래쪽으로 떨어진다.

이렇게 빛을 복사하도록 유도하는것을 **강제복사(유도복사)**라고 부른다.

강제복사에서 나오는 빛은 진동수뿐만아니라 진행방향, 자리각 및 진동면 등이 쪼인 빛과 같다. 그러므로 많은 전자가 려기상태에 있을 때 그중 하나의 전자가 떨어지면서 빛을 복사하면 이 빛이 다른 전자를 떨구어 강제복사를 일으키고 이것이 또 다른 전자들의 강제복사를 련이어 일으켜 진동수, 자리각, 진행방향 및 진동면이 같은 간섭조건을 만족시키는 빛량자가 사태처럼 늘어난다.

이것은 강제복사에 의하여 빛을 증폭할수 있다는것을 의미한다.(그림 8-12)

그림 8-12. 강제복사에 의한 빛의 증폭

※ 레이자(LASER)→영어글자 “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”의 첫 글자로 만든 단어이다.
의미는 <강제복사에 의한 빛의 증폭>이라는 뜻이다.

레이자물질과 발진

❓ 련속적인 강제복사의 방법으로 증폭된 빛을 얻으려면 어떤 조건이 갖추어져야 하는가.

빛복사는 려기준위에 있던 전자가 바닥준위에로 내려오는 과정이므로 강제복사를 일으키는 물질에는 려기준위가 있어야 하고 거기에 있는 전자수가 바닥준위에 있는 전자수보다 많아야 한다.

만일 바닥상태에 있는 전자수가 더 많다면 빛을 쪼일 때 강제복사하는 전자보다 빛을 흡수하는 전자가 많아져서 빛은 잦아들게 된다.

따라서 강제복사에 의하여 빛이 세지려면 려기준위에 있는 전자의 수가 바닥준위의 전자수보다 많아야 한다.

보통상태에서는 이러한 상태가 실현될수 없으므로 이런 상태를 **부온도상태**라고 부른다.(그림 8-13)

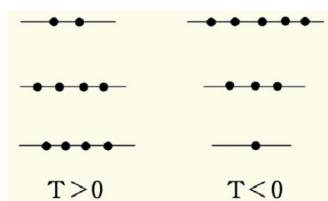
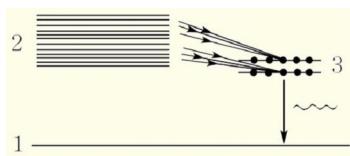
그림 8-13. 보통상태와 부온도상태의 전자분포

❓ 부온도상태가 어떻게 실현될수 있는가.

홍보석($A\ell_2O_3$결정에 Cr이 0.05% 섞인)과 같은 결정은 특수한 조건을 지어주면 부온도상태로 된다.(그림 8-14)

그림 8-14. 홍보석에서 부온도상태의 실현

홍보석은 에네르기준위가 특이하다. 거기에는 바닥준위 1과 첫째 려기준위 3이 있고 그우에 넓은 진동수구간의 빛량자의 에네르기를 받아 바닥준위의 전자가 올라갈수 있는 띠 2가 있다.

여기에 센 보통빛을 쪼이면 바닥준위의 전자들은 띠 2로 올라간다. 그러나 곧(10^{-8}s 안에) 3으로 뛰여내려 거기에 상당히 오래동안(10^{-3}s 정도) 머무른다.

※ 불확정성관계식은 에네르기와 시간사이에도 성립한다.

$$\Delta E \cdot \Delta \tau \geq h$$

전자의 에네르기값이 폭이 있으면 머무름시간 $\Delta\tau$ 값이 작으며 에네르기값이 좁으면 머무름시간이 길어진다.

그리하여 이사이에 부온도가 형성된다.

부온도상태의 에네르기띠구조를 가지고있는 물질을 **레이자물질**이라고 부른다.

강제복사에 의하여 련속적으로 방출되는 빛들이 다같은 특성량을 가지겠는가.

주어진 레이자물질은 에네르기띠구조가 같아도 작용하는 빛에 따라 강제복사되는 빛의 특성량이 달라질수 있다.

레이자물질의 량쪽에 두 평행거울을 놓고 빛이 레이자물질을 지나 거울사이로 오가게 만들자.(그림 8-15) 그러면 두 거울사이에는 정상파를 이루는 빛만이 존재하게 된다.

레이자물질의 바닥준위 1에 있던 전자들을 려기준위 3으로 계속 올려보내면 부온도상태가 유지되면서 증폭작용이 계속되게 된다.

※ 홍옥결정과 류사한 에네르기띠구조를 가진 레이자물질은 수많이 개발되여 현재는 기체레이자, 액체레이자, 반도체레이자, 고체레이자 등이 수백종 있다.

만일 이때 한쪽 거울을 반투명으로 만들면 일정한 값이상으로 증폭된 빛은 반투명거울을 거쳐나간다.

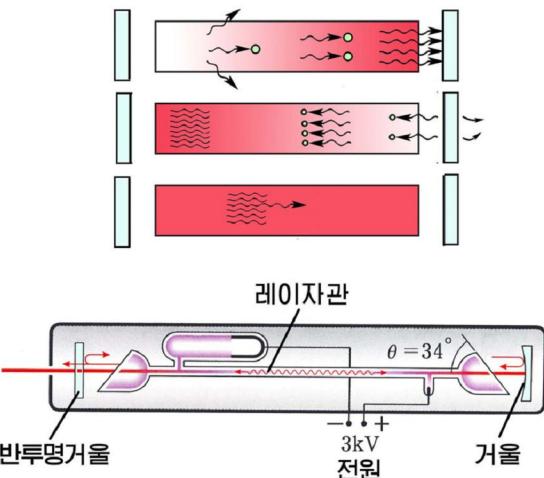



그림 8-15. 레이자발진의 원리와 레이자관

레이자빛의 특성과 리용

레이자빛은 센 광원이 내보낸 빛과 무엇이 다른가.

레이자관에서 발진될 때 작용하는 빛은 두 평행거울로 된 공진기를 거치면서 진동수, 진행방향, 자리각들이 어긋나는것은 다 지워지고 같은것만이 남게 된다. 따라서 레이자빛은 몇가지 특성을 가진다.

레이자빛은 진동수가 일정한(단색인) 리상적인 평행빛이며 세게 증폭되므로 세기가 크다. 따라서 레이자빛은 간섭, 에돌이를 잘 일으키므로 3차원상을 얻는 파면사진학(홀로그라피)이라는 새로운 학문분야를 나오게 하였으며 여러가지 측정장치에 리용된다. 즉 직진성이 크고 파장이 일정하므로 거리를 정확히 재는데도 쓰인다.

※ 홀로그라피는 그리스어로 <완전히 기록>한다는 뜻이다. 홀로그라피는 연구대상의 모든 정보를 3차원적으로 정확히 표시하는 파학기술분야이다.

자연계에는 리상적인 단색빛 즉 한가지 파장만을 가진 빛이 없다. 빛의 단색성 정도는 파장퍼짐대역 $\Delta\lambda$로 평가한다.

레이자빛이 나오기 전에 단색광원으로 써온 ^{86}Kr등은 $\Delta\lambda = 4.7\times10^{-2}$nm인데 He-Ne레이자빛은 $\Delta\lambda < 10^{-6}$nm이다.

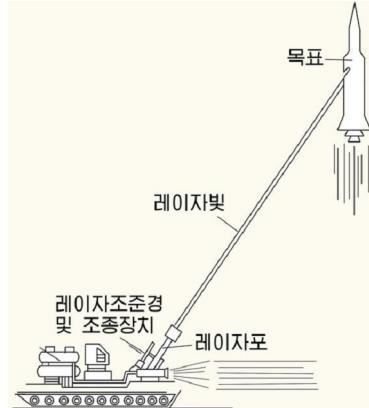
레이자빛은 전자기파처럼 증폭, 변조, 검파를 할수 있으므로 통신과 탐지에 쓴다.

레이자장치에서 레이자물질로 어떤것을 쓰는가에 따라 매우 센 레이자빛을 얻을수 있다.

센 레이자빛은 매우 굳은 물체에 구멍을 뚫을수 있으며 미세한 용접과 수술칼로 쓸수 있다.

레이자빛은 높은 에네르기집중성을 리용하여 높은 온도를 얻을수 있으며 열핵반응을 일으킬수 있다. 또한 강한 레이자빛을 리용한 레이자무기들까지 개발되고있다.(그림 8-16)

그림 8-16. 레이자포

문 제

1. 레이자빛을 얻는데 왜 강제복사가 쓰이는가?
2. 부온도상태의 특징은 무엇인가?
3. 레이자빛으로 거리를 재려면 어떻게 해야 하는가?

제5절. 초전도

금속의 전기저항은 온도가 낮아지면 작아진다.

금속의 온도를 계속 낮추면 전기저항이 얼마까지 작아지겠는가.

초전도현상의 발견

20세기초에 전기전도성에 대한 낮은 온도의 영향에 대해서는 서로 상반되는 두가지 리론이 제기되였다.

그중 하나는 온도가 낮아질 때 금속에서 원자들의 진동이 보다 약해지며 전자들은 원자들과 매우 드물게 충돌하므로 전기전도도는 증가하며 T=0일 때 저항이 령으

로 다가간다는것이다.

다른 하나는 낮은 온도에서 전도전자들이 원자와 더 심하게 결합되므로 T=0일 때 저항이 무한히 크게 된다는것이다.

두가지 리론의 론쟁은 온네스의 실험에 의해서 결속되였다.

극저온을 얻는 방법을 연구하여 액화할수 없는 물질로 알려진 원소인 헬리움의 액화에 성공한 온네스는 4K 근방의 매우 낮은 온도에서 물질의 전기적성질을 조사하였다.

그는 여러가지 도체의 전기저항이 온도에 따라 어떻게 변화되는가를 밝히려 하였다.

처음에 온네스는 낮은 온도에서 백금의 저항을 측정하였다.

여기서 얻은 결과는 낮은 온도일 때 백금의 저항은 일정한 값에 다가간다는것이다. 그러나 온네스는 각이한 조건에서 여러가지 시편의 저항이 금속들이 순수할수록 더 작아진다는데 주의를 돌렸다. 이로부터 그는 온도가 0K로 다가갈 때 남아있는 저항이 금속안에 있는 불순물과 관련되여있다고 보았다. 따라서 0K일 때 순수한 금속은 무한히 큰 전도성을 가져야 한다는것이다.

어떻게 하면 보다 순수한 시편을 얻겠는가.

금은 백금보다 불순물을 제거하기에 더 편리하다. 그는 금을 리용하여 시험하였는데 온도가 0K로 다가갈 때 금의 비저항은 백금에서보다 더 작아졌다.

온네스는 보다 순수한 도체를 얻으려고 하던중 수은에 주목을 돌리였다.

수은은 보통온도에서 액체상태로 존재하므로 증류의 방법으로 불순물을 깨끗이 제거할수 있었다. 수은으로 진행한 실험은 예상밖의 결과를 주었다.

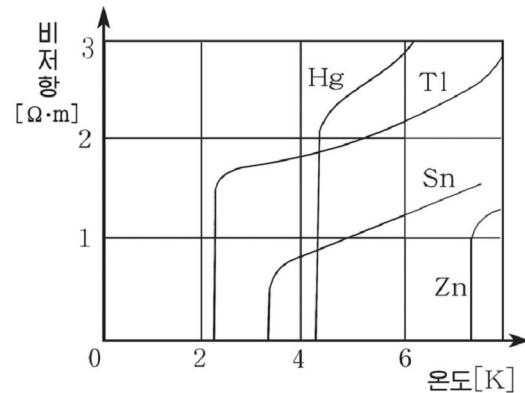
온도를 감소시킴에 따라 수은의 비저항은 처음에는 천천히 감소하였으나 4.1K에서 갑자기 떨어져 잴수 없게 작아졌다.

온네스는 이 실험결과를 초전도성이라고 부르면서 초전도상태의 작은 저항값을 재여보려고 여러가지로 시도하였으나 성공하지 못하였다. 따라서 그는 초전도상태에서 수은의 저항이 령이라는 결론을 내렸다.(그림 8-17)

그림 8-17. 몇가지 금속의 비저항의 온도변화

수K아래의 극저온에서 전기저항이 0으로 되는 현상을 **초전도현상**이라고 부른다.

저항이 령일 때 초전도체에서 전류의 세기가 작아지지 않고 계속 흐른다는것을 2년동안 진행한 실험으로 확증하였다.

※ 초전도현상에서 얻은 결과는 직류에서만 성립하며 교류에서 초전도체의 저항은 령이 아니다.

초전도현상의 특성

초전도현상의 발견은 전기공학의 발전에 큰 전망을 열어놓았다. 중요한것은 초전도전자석이 전기에네르기를 전혀 소비하지 않으며 그것을 리용하여 센 자기마당을 얻을수 있다는것이다.

온네스는 처음으로 초전도자석을 만들기 시작하였으나(1931년) 실패하였다.

이것을 계기로 초전도체들의 특성을 구체적으로 조사하기 시작하였다.

우선 초전도체들은 어떤 온도보다 낮은 온도에서만 초전도성을 가진다는것을 알아냈다. 이 온도를 **림계온도**라고 하는데 그것은 물질마다 다르다.

초전도체의 림계온도

물 질	림계온도[K]	물 질	림계온도[K]
티 탄	0.4	석	3.8
우라니움	0.8	수 은	4.1
아 연	0.9	연	7.2
알루미니움	1.2	네오비움석	18.1

다음으로 초전도성은 외부자기마당이 일정한 크기(**림계자기마당**)보다 커지면 없어진다. 초전도체에 흐르는 센 전류도 역시 초전도성을 파괴한다는것을 알게 되였다. 초전도체를 리용하여 센 전자석을 만들려던 온네스의 시도는 이에 의하여 실패하였다.

초전도체의 다른 하나의 특성은 초전도체속에서 자기마당이 항상 령이라는것이다. 외부자기마당을 걸면 초전도체속에서는 이것과 크기가 같고 방향이 반대인 자기마당이 생겨 그속의 자기마당을 지운다. 즉 초전도체는 완전반자성체이다.

그릇모양으로 만든 초전도체에 자석을 놓으면 그릇이 반대로 자화되여 자석을 밀므로 자석이 그릇에 떠있게 된다.(그림 8-18)

그림 8-18. 자석이 떠있다

초전도현상의 원인은 무엇인가.

초전도현상의 원인은 이 현상이 발견된 때로부터 50여년이 지난 후에야 초보적으로 밝혀졌다.

이 특이한 현상을 밝히려면 매우 낮은 온도에서 전자들의 상태와 움직임이 보통온도때와는 다르다고 보아야 한다.

전기저항은 전자들이 살창마디에 있는 이온과 작용하여 산란되기때문이다.

그런데 초전도상태에서는 전자의 열운동에네르기가 매우 작으므로 전자들사이의 호상작용이 나타난다. 이때 스핀이 반대인 전자들은 쌍을 지어 운동하면서 금속결정의 살창과 호상작용하여도 산란되지 않는다.

이처럼 초전도체에서 전기나르개인 쌍전자는 저항을 받지 않고 계속 운동한다.

초전도현상의 응용

초전도체를 리용하는 문제는 림계온도가 높은 초전도체를 개발할 때에만 가능하다.

세계적인 관심속에 1986년에는 단순물금속이 아닌 란탄-바리움-동산화물의 림계온도가 35K라는것이 밝혀졌고 다음해에는 이트리움-바리움-동계의 산화물의 림계온도가 98K라는것이 알려졌다.

그후에는 125K까지의 온도범위에서 초전도성을 나타내는 여러가지 비스무트계, 탈리움계, 수은계의 산화물고온초전도체들이 련이어 개발되고있다.

또한 초전도체의 림계온도뿐만아니라 림계자기마당, 림계전류밀도의 값이 높고 가공하기 쉬운 재료들을 련이어 찾아내고있다.

초전도체는 우선 강한 전자석을 만드는데 리용된다.

그림 8-19. 초전도렬차

최근에 500GeV의 에네르기를 얻는 직경 2km의 가속장치에 초전도자석을 설치하여 1 000GeV의 에네르기를 얻어냈다. 초전도자석이 뜨는 효과를 리용하여 초고속렬차도 만들었는데 자기방석에서 달리는 초전도렬차는 500km/h의 속도로 달리면서 7km 구간에서 시험운행되고있다.(그림 8-19)

센 초전도자석은 조종열핵반응을 위한 대전립자의 가속장치에 리용된다.

앞으로 고온초전도체의 개발은 전기공학, 전자공학, 콤퓨터기술의 모든 분야에서 새로운 기술적변혁을 가져올것이다.

초전도현상의 원인

초전도현상의 본질은 20세기 상반기에 연구해오던 과정에 1957년에야 BCS리론을 내놓으면서 밝혀졌다.

초전도체에서 전자는 스핀이 서로 다른 전자와 결합하여 쌍전자를 이룬다.

정전기적으로 서로 반발하는 두개의 전자가 결합되려면 반드시 이 밀힘보다 더 큰 결합력이 작용하여야 한다.

초전도체에서 전자들은 10^6m/s의 빠른 속도로 운동하면서 살창을 이루고있는 +이온들과 작용하여 진동을 일으킨다. 이 호상작용과정에 전자와 전자사이에는 끌힘이 생기여 전자쌍이 형성된다.

초전도체에 전자쌍이 존재한다는것은 실험적으로 확증되였다.

1. 저항이 작은 금속이 극저온에서는 초전도체로 잘되지 않는다. 왜 그런가?
2. 초전도체는 어디에 쓸수 있는가를 실례를 들어 설명하여라.
3. 초전도현상을 과학과 기술에서 어떻게 리용할수 있는가를 실례를 들어 착상하여보아라.

제6절. 초고압

진공과 같이 낮은 압력하에서의 여러가지 물질의 성질은 많이 연구되였다.

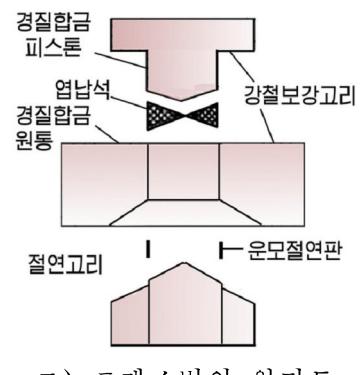
그러면 반대로 높은 압력에서의 물질의 성질은 낮은 압력에서와 같겠는가. 이 문제를 해명하려면 우리가 얼마나 높은 압력을 얻을수 있는가를 알아야 한다.

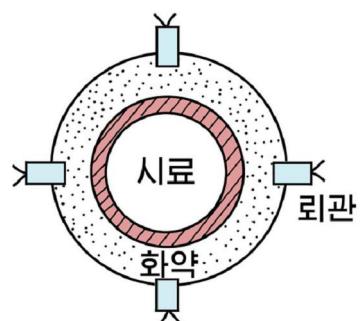
현대적인 기술로는 수백GPa의 압력을 얻을수 있다.

흔히 2～3GPa이상의 압력을 **초고압**이라고 부른다.

초고압을 얻는 방법

초고압을 얻는데는 흔히 프레스법과 폭발법을 쓴다.

프레스법. 큰 압력에 견딜수 있게 특별히 만든 실린더와 피스톤에 큰 힘을 주어 초고압을 얻는 방법이다.(그림 8-20 의 ㄱ)

초고압을 얻는 프레스에서는 액체를 누르는 방법을 쓸수 없다. 흔히 액체는 압력이 커지면 끈기가 커지는데 압력이 1GPa 이 되면 고체처럼 된다. 그러므로 초고압장치에서는 압력을 전달하는 매질로서 고체를 쓴다.

폭발법. 화약이 폭발할 때 생기는 충격파를 리용하여 짧은 시간동안에 작용하는 초고압을 얻는 방법이다.

실례로 화약을 밀페된 그릇에 넣고 폭발시키면 순간적으로 높은 온도의 기체상태로 되면서 큰 압력을 그릇에 준다. 이때 그릇이 견디지 못하고 파렬되는데 이것을 리용한것이 수류탄과 포탄이다.(그림 8-20의 ㄴ)

ㄱ) 프레스법의 원리도

ㄴ) 폭발법의 원리도

그림 8-20. 프레스법과 폭발법

초고압에서 물질의 성질

물체에 초고압이 작용하면 무엇이 변하겠는가.

물체를 이루는 원자들은 밀힘과 끌힘이 비기는 평형자리에 있다. 여기에 초고압이 작용하면 원자들은 서로 센 끌힘을 받을 때와 같이 원자들사이의 간격이 좁아진다. 그러면 결정의 에네르기띠는 점점 넓어지면서 겹치기 시작한다. 그러므로 압력을 높이는데 따라 물체는 부도체→반도체→도체→플라즈마에로 넘어간다.

실례로 보통상태에서는 부도체인 금강석도 압력이 300GPa정도에 이르면 도체로 된다.

압력이 크게 변하지 않으면 이러한 변화는 없어도 유전률, 투자률, 전기전도도 및 열전도 등 여러가지 물리적량들이 달라진다.

흥미있는것은 압력이 커질 때 초전도체의 림계온도가 높아지는 현상이다.

초고압에서 원자들사이의 간격이 좁아진다면 살창구조도 변화시킬수 있지 않는가.

고체에서 원자들은 살창구조를 이루며 살창상수와 결합력은 방향에 따라 다르다. 따라서 결정은 비등방성을 띤다.

고체에 초고압을 작용시킬 때 원자들사이의 간격이 변화되면 살창구조가 달라질수 있다.

실례로 보통압력에서는 흑연의 살창구조가 바뀌지 않지만 압력이 높고 온도가 높으면 살창구조가 바뀌여 금강석으로 된다.(그림 8-21)

이로부터 천연금강석은 깊은 땅속에서 높은 압력과 온도의 영향에 의해 흑연으로부터 금강석으로 변한것이라고 볼수 있다.

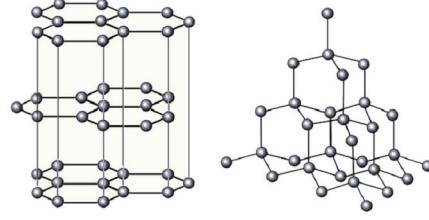



그림 8-21. 초고압, 고온에서 흑연의 살창구조가 금강석구조로 변한다

초고압의 응용

초고압물리학이 거둔 성과의 하나는 금강석을 인공적으로 합성한것이다.

흑연으로부터 금강석으로의 변화는 약 13∼15GPa의 압력과 2 000K의 온도에서 일어난다. 그러나 촉매(Fe, Co, Ni 등)를 쓰면 4.2∼4.5GPa의 압력과 1 200∼1 400K의 온도에서도 금강석이 합성된다.

화약을 밀페된 탕크속에서 폭발시키는 방법으로 금강석분말을 얻을수 있다. 이러한 금강석분말은 결면세밀가공에 중요하게 쓰인다. 금강석은 굳기가 모든 물질들중에서 최고값을 가지지만 높은 온도에 견디지 못하는 결함이 있다.

과학자들은 금강석을 합성한것과 같은 방법으로 금강석과 결정구조가 비슷하며 굳기가 센 BN결정(보라존)을 얻었다. 보라존은 천연적으로는 존재하지 않는다. 보라존은 높은 온도에서도 안정하므로 고속절삭공구로 널리 쓰이고있다.

초고압은 결정성장에도 널리 리용된다. 결정들은 보통압력에서보다 초고압에서 더 빨리 자란다. 그뿐만아니라 어떤 결정들은 초고압하에서만 성장되므로 결정성장

에서 초고압기술이 긴요하게 쓰인다.

최근 레이자물질들인 α-Ga_2O_3, $YGaO_3$, $CaGaO_3$ 등의 단결정을 4.4~7.7GPa, 1 273K에서 크게 성장시키는데 성공하였다.

초고압은 전자석의 선륜에 작용시켜 센 자기마당을 얻는데도 리용된다.(그림 8-22)

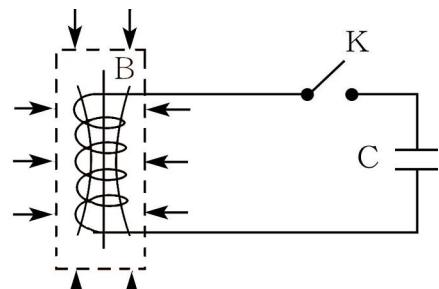



그림 8-22. 폭죽법

[례제] 방안온도에서 게르마니움속에 있는 전도전자수밀도가 $n_e=3\times10^{19}m^{-3}$이다. 이 수는 전체 원자수의 얼마에 달하는가? 게르마니움의 밀도는 $\rho=5\ 400kg/m^3$, 게르마니움의 몰질량은 M=0.073kg/mol이다. 게르마니움에 질량비률로 $p=10^{-5}\%$를 이루는 비소혼입물을 넣었을 때 전도전자수밀도는 몇배 증가하는가?

비소와 게르마니움의 몰질량은 동일하다고 생각한다.

풀이. 게르마니움원자의 수는 $N=\frac{m}{M}N_A$에 의하여 규정된다. 따라서 게르마니움 원자수밀도 $n=\frac{N}{V}=\frac{\rho}{M}N_A$에 대한 게르마니움속에 있는 전도전자수밀도의 비는

$$\frac{n_e}{n}=\frac{n_e M}{\rho N_A}=\frac{3\times10^{19}\times0.073}{5\ 400\times6\times10^{23}}=6.7\times10^{-10}$$

이다. 비소혼입물의 전도전자수밀도는

$$n_{비소}=\frac{p\rho}{M}N_A$$

이며 이때 전도전자수밀도는 $n_1=n_{비소}+n_e=pn+n_e$이다. 여기로부터

$$\frac{n_1}{n_e}=\frac{p\rho N_A}{Mn_e}+1=\frac{10^{-5}\times10^{-2}\times5\ 400\times6\times10^{23}}{0.073\times3\times10^{19}}+1\approx149$$

비소혼입물을 넣었을 때 전도전자수밀도는 약 149배 증가한다.

문 제

1. 초고압을 어떻게 얻는가?
2. 초고압에서 물질의 성질이 어떻게 변하는가?
3. 우리 생활에서 초고압의 실례를 찾아보아라.

제 7 절. 나노기술의 기초지식

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《정보기술, 나노기술, 생물공학은 현시대 과학기술발전의 핵심기초기술입니다.》

현시대는 과학과 기술의 시대이다.

과학과 기술은 지금 세계적으로 비상히 빠른 속도로 발전하고있는데 그중에서도 정보기술, 나노기술, 생물공학은 모든 최신과학기술의 발전과 밀접히 련관되여있다.

최근에는 과학기술분야에서뿐만아니라 일상생활에서도 나노기술, 나노재료라는 용어를 자주 쓰며 나노재료제품들이 나오기 시작하였다.

나노란 무엇인가

나노라는 말은 원래 그리스어로 매우 작다는 뜻으로서 길이, 질량, 시간과 같은 량들의 크기를 나타낼 때 기준량에 비하여 작아지는 정도를 표시하는 앞붙이이다.

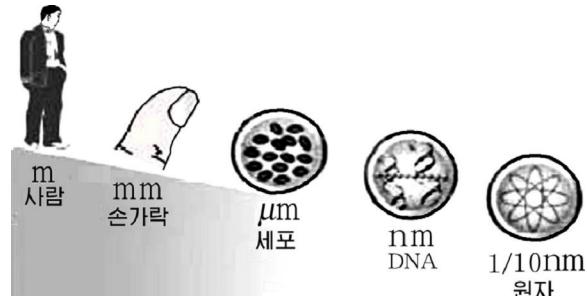
다시말하여 나노란 마이크로(μ)와 피코(p) 즉 10^{-6}과 10^{-12}사이인 10^{-9}을 나타내며 기호 《n》으로 표기한다.

그림 8-23. 1nm의 크기

례를 들어 나노뒤에 길이의 단위가 붙은

$$1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$$

는 기준량 1m보다 10억분의 1만큼 작다는것을 의미한다.

1nm의 크기는 데핵산(DNA)크기정도이며 그것은 눈으로 볼수 없다.(그림 8-23) 1m와 1nm의 크기를 비교하면 지구와 탁구공정도의 크기로 생각할수 있다.

나노물리학

물리학, 화학, 생물학과 같은 자연과학은 자연을 정복하기 위한 인간의 자주적인 활동과정에 발생하여 발전하여왔다.

그 과정에 사람들은 자연과학의 연구대상을 눈으로 직접 볼수 있는 주위세계의 단순한 자연현상으로부터 해와 달, 행성들의 운동과 은하계와 우주의 운동으로 넓혀나갔다.

또한 사람들은 물질운동의 근원을 밝히면서 분자나 원자와 같은 미시세계에로 연구를 심화시켰다.

20세기말까지 물리학자들은 거시세계에 관한 물리학과 미시세계에 관한 물리학이면 물질의 전체 대상을 다 연구할수 있다고 생각하면서 그 중간크기의 물질에 대

하여 특별한 주의를 돌리지 않았다.

※ 고전물리학에서 거시적이라는 의미는 사람이 볼수 있는 가장 작은 대상을 아래한계로 정하고 웃한계는 무한히 넓은 우주에까지 이른다고 보는 크기이고 미시적이라는 의미는 분자, 원자를 가장 큰것으로 보고 아래한계는 무한히 작은 크기라는 뜻이다.

미시세계에 관한 물리학이 발전하여 원자의 속박에서 벗어난 자유전자들이 나타내는 물질의 성질을 연구하기 시작하면서 이 자유전자들의 자유행로가 1nm정도라는것을 알게 되였고 이러한 중간크기를 가지는 물질의 성질을 연구할 필요성이 제기되였다.

이로부터 1981년에 처음으로 중간대역물리학이라는 표현이 나왔는데 이 대역의 크기가 1nm정도이므로 **나노물리학**이라고 부르기 시작하였다.

나노기술과 그 전망

nm척도에서 원자, 분자를 조작하여 구조나 배렬을 조종하고 물질의 새로운 기능이나 보다 우월한 특성을 발현시키기 위한 기술을 **나노기술**이라고 부른다.

나노기술은 많은 현대적인 선진과학기술을 기초로 한 과학기술이며 현대과학(량자력학, 분자생물학 등)과 현대기술(미소전자공학기술, 콤퓨터기술, 고분해능현미경기술, 핵분석기술 등)이 결합된 산물이다.

일화 나노기술의 선구자들

《나노기술》이라는 개념을 내놓은 사람은 물리학자 페인먼이다. 그는 1959년에 나노기술을 리용하면 전세계에 있는 모든 책의 정보를 한알의 모래알에 수록할수 있다고 말하였다. 그 근거로는 정보 1bit를 한 변에 원자가 5개씩 있는 바른6면체로 나타내면 1bit당 원자수는 5×5×5=125로 되며 전세계에 있는 2 400만권의 책에 있는 정보전체를 수록하는데는 모래알보다 더 작은 물체가 있으면 된다는것이다.

1959년은 IC가 갓 발명된 시기이며 《소형화》기술에 대한 관심이 급격히 높아지고있던 이 시기에 페인먼자신은 물론 대다수가 설마 이 착상이 인차 달성되리라고는 애당초 생각을 하지 못하고있었다.

그런데 그때로부터 11개월후에 마크레란이 직경이 0.01mm인 에나멜동선을 직경 0.008mm인 축에 감아서 잘 돌아가는 전동기를 만들었다. 물론 이 전동기는 《나노기계》와는 전혀 다른 《마이크로기계》에 해당되는것이였다. 말하자면 지금의 전동기의 부속품을 무한히 작게 하여 그것을 조립한 《깎아내는 방식》으로 만들어낸것이다.

한편 에리크 드렉스라는 원자나 분자를 조작하여 《조립하여 쌓는 방식》으로 《분자기계》를 내놓았다.

그것은 앞으로 과학과 기술발전의 추세를 대표하며 또한 현대첨단과학과 새로운 학문발전의 기초로 되게 될것이다.

21세기 과학기술산업의 중요한 내용을 이룰 나노기술은 나노물리학, 나노화학, 나노생물학, 나노재료학, 나노전자공학뿐아니라 나노공학과 나노가공학을 기본으로 하는 응용과학을 포괄한다. 다시말하여 나노과학기술은 첨단과학과 고도기술의 집합체이다.

나노과학기술이 추구하고있는 최종목표는 인류가 자기의 요구에 따라 임의로 하나의 원자와 분자를 조종하고 또한 자연계의 물질에 대한 본질을 깊이 탐구하고 연구하는 기초우에서 원자와 분자의 수준에서 전혀 새로운 물질을 설계하고 만들도록 하는것이다.

나노과학기술이 생겨난지는 얼마밖에 안되지만 몇가지 중요한 방면에서 큰 전진을 이룩하였으며 인류가 끊임없이 새로운 기적을 창조해낼수 있게 하는 하나의 《원천》으로 되고있다.

일반적으로 최첨단과학기술이란 현재뿐아니라 앞으로의 사회경제발전에서 결정적의의를 가지며 현대과학기술발전에서 선도적이고 관건적인 역할을 하는 과학기술을 말한다. 새 세기 첨단과학기술의 관건적기초는 다름아닌 나노과학기술이며 21세기는 《나노시대》로 될것이라고 예측하고있다.

따라서 21세기 나노과학기술은 사람들의 건강을 증진시키고 생산을 비약적으로 안전하게 높이는데 큰 영향을 줄것이며 최첨단기술의 발전을 좌우하고 21세기 사회경제발전에 큰 영향을 줄것이다.

왜 지금 나노기술을 떠드는가

지금 나노기술을 발전시키는것이 세계적추세로 되고있는것은 《오늘》이라는 시대적배경과 관련된다.

오늘의 시대는 과학과 기술이 급속히 발전하여 이전의 기계제산업으로부터 정보산업으로 이행하고 새로운 산업들이 출현하는 시기, 나노기술에서 매우 중요한 요소들인 《관찰하는 기술》, 《미세하게 가공하는 기술》, 《밑으로부터 쌓아올리는 기술》이 갖추어져 《나노》령역에 발을 들여놓은 시기, 나노세계에서 매우 중요한 기능을 담당하고있는 새로운 세계들이 밝혀진 시기이다. 특히 중요한것은 여러 분야에서의 과학기술이 nm크기에서 물질구조나 배렬을 조종하는 시대에 들어섰다고 볼수 있다.

지난 시기 새롭고 흥미있는 물성을 나타내는 사실로부터 기대를 모으는 거시-미시사이의 중간령역의 물리학, 초분자분야의 화학, 나노생물, 나노기계 등이 제각기 독립적인 기술로 여겨왔으나 공통점이 많고 거의 차이가 없다는데로부터 서로의 련계를 강화하고 하나의 목적을 지향하는 방향으로 나가고있다. 따라서 나노기술에 대한 연구는 나노라는 하나의 공통된 인식을 가지고 통일적으로 진행하는것이 가장 합리적인 방도라고 할수 있다.

1. 원자의 크기와 빛파장을 nm로 표시하여라.
2. 1nm의 크기를 사과 1알의 크기로 생각하면 1m는 지구크기의 몇배로 볼수 있는가?
3. 전기마당에서 1 000V에 의하여 가속된 전자의 파장은 몇nm이며 이것은 원자크기의 몇배와 맞먹는가?

제 8 절. 나노재료와 그 분류

나노재료

물질이 어떤 성질을 나타내는 근원은 그 물질을 이루는 재료의 구성단위이다. 나노기술로 만든 나노정도의 크기를 가진 초미립자를 **나노립자**라고 부르며 나노립자들의 응집체를 **나노재료**라고 부른다.

나노립자는 보통의 미분립자보다 작으며 광학현미경으로 관찰할수 없다.

실례로 적혈구의 크기는 7 000～9 000nm, 세균의 크기는 2 000～3 000nm이므로 광학현미경으로 볼수 있으나 비루스의 크기는 수십nm로서 광학현미경으로 볼수 없다.

거시세계에서 큰 덩어리물체를 기계적으로 분쇄하면 μm크기의 미립자들로 만들수 있으나 그것의 성질은 크게 변하지 않는다. 그러나 특이한 방법으로 물체를 분쇄하여 나노립자들로 만들면 물리화학적성질 즉 력학적, 전기 및 자기적, 열적, 광학적성질이 일반고체와 근본적으로 달라진다.

이처럼 물리학적으로 볼 때 나노라는 말은 단순히 크기가 아주 작다는 의미일뿐아니라 립자의 크기가 어떤 한계까지 작아지면 질적변화가 일어나면서 그것의 물리적성질이 급격히 변한다는 의미도 들어있다.

나노립자의 성질이 질적변화를 일으키는 림계크기는 재료의 물리화학적성질, 재료의 종류, 조건에 따라 변할수 있으나 대체로 0.1μm이하라는것이 실험적으로 확

초기나노재료

인공적으로 나노재료를 만든 력사는 적어도 1 000여년 전이다. 옛날 사람들은 초가 탈 때 나오는 탄소그을음을 먹의 원료와 착색물감으로 썼다. 이것이 바로 최초의 나노재료라고 말할수 있다. 또한 고대의 동거울겉면의 녹방지층은 분석을 통해 산화석나노립자로 이루어진 박막층이라는것이 밝혀졌다. 그러나 당시 사람들은 이것이 눈으로는 볼수 없는 나노크기의 작은 립자들로 이루어진것이라는것을 몰랐다.

증되였다. 따라서 나노재료는 크기가 100nm이하인 나노립자들로 된 재료이다.

나노재료의 분류

나노재료는 그것의 크기에 의하여 특성이 나타나므로 크기로 나타내는 형태에 따라 분류할수 있다.

나노기술이 발전함에 따라 나노재료의 형태는 더욱더 다양하게 되지만 나노립자들의 공간배렬형식에는 몇가지가 있다.

나노재료가 발전하는 초기에는 나노재료라고 하면 나노립자와 그것으로 이루어진 나노박막과 나노고체를 의미하였다.

현재는 넓은 의미에서 나노재료라고 하면 3차원공간에서 적어도 한개의 차원이 나노크기의 범위에 놓이거나 그것으로 구성되는 재료이다.

우선 나노재료에는 공간에서 3차원크기가 모두 나노정도의 크기인 나노립자가 있다. 이처럼 3차원공간이 모두 나노척도인 재료를 **0차원나노재료**라고 부른다.

다음으로 나노재료에는 공간에서 2차원크기가 나노정도의 크기인 나노선, 나노봉, 나노관과 같은 선모양의 재료가 있다. 이처럼 공간에서 두개의 차원이 나노척도인 재료를 **1차원나노재료**라고 부른다.

또한 나노재료에는 공간에서 1차원크기가 나노정도의 크기인 초박막, 다층막과 같은 곡면모양의 재료가 있다. 이처럼 공간에서 한개의 차원이 나노척도인 재료를 **2차원나노재료**라고 부른다.

우에서 보는바와 같이 나노재료는 이상하게도 공간에서 몇개의 차원의 크기가 나노척도에 놓였는가를 평가하지 않고 반대로 몇개의 차원의 크기가 나노척도에 도달하지 못하였는가로 분류한다.

이러한 나노재료들은 구성성분이 단일하고 하나의 상으로 이루어졌기때문에 **나노결정** 또는 **나노상재료**라고 부른다.

이밖에도 나노립자들이 결합되여 이루어진 나노물체(덩어리)가 있는데 이것을 **3차원나노재료**라고 부른다.

여러가지 나노물질

분 류	모 양	실 례
0차원	구형	원자클라스터 나노립자
1차원	침상형	나노관 나노선
2차원	박막형	나노박편 나노띠 나노박막
3차원	덩어리형	나노사기 나노금속 초살창반도체

나노재료에는 여러가지 형태의 나노결정들을 결합시켜 물리적, 화학적 및 기계적성질이 특이한 **나노복합재료**도 있다.

나노복합재료는 나노립자와 나노덩이, 나노박막의 복합재료이다. 즉 각이한 차원의 나노재료들이 복합되여 생긴 재료이다.

나노복합재료는 나노단순재료와는 달리 복합성분들중의 어느 한 종류의 재료의 립자크기가 나노크기를 가진 복합재료이다.

나노복합재료를 형성하면 종래의 거시적 및 미시적복합방법에서는 얻을수 없던 성질을 나타낸다. 또한 당김세기, 튐성률, 열변형온도 등의 성질이 비약적으로 좋아진다.

문 제

1. 0차원나노재료의 실례를 3가지이상 써보아라.
2. 1차원나노재료와 2차원나노재료의 차이를 실례를 들어 설명하여라.
3. 나노복합재료의 실례를 참고서에서 3가지이상 찾아보아라.

제 9 절. 나노재료의 성질

몇가지 대표적인 나노재료

나노물질은 다양한 형태와 구조를 가지는데 그가운데서 가장 전형적인 나노재료는 탄소나노재료이다.

C_{60}플러렌. 일반적으로 덩어리재료의 탄소물질로는 흑연과 금강석이 알려져있다.

흑연의 구조는 탄소원자가 6각고리그물모양을 형성하면서 층상으로 배렬되여있으며 금강석의 구조는 탄소원자가 4면체로 견고하게 결합되여있다. 이러한 결정구조의 차이로 하여 흑연은 무른 재료이지만 금강석은 자연계의 물질가운데서 가장 굳은 재료이며 값비싼 보석으로 되고있다. 또한 흑연은 도체이지만 금강석은 반도체이며 색갈도 다르다.

1985년에 탄소원자로 이루어진 축구공모양의 새로운 물질(플러렌)이 발견되였다.

C_{60}플러렌은 12개의 5각형과 20개의 6각형으로 이루어진 32면체구조를 가지고있다. 비교적 잘 연구된 C_{60}플러렌은 탄소원자 60개가 모여 마치도 축구공과 같이 속이 빈 구모양의 구조를 이루고있는데 직경은 약 0.7nm정도이다.(그림 8-24)

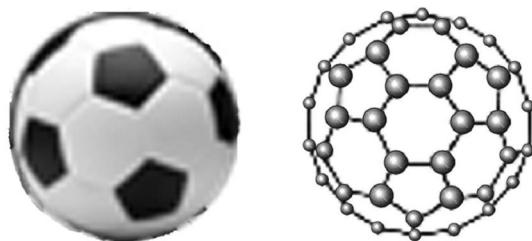



그림 8-24. 축구공모양의 C60플러렌

탄소나노관. 지금 나노기술분야에서 가장 주목되는 재료의 하나가 탄소나노관이다. 금강석, 흑연, 플러렌(C_{60})에 련이어 탄소의 4번째 형태로서 알려지고있는 탄소나노관은 탄소원자 그자체로부터 만들수 있는 새로운 물질이다.

탄소나노관은 겉면이 탄소원자들의 6각형그물로 이루어진 원통형의 물질이다.

탄소나노관은 세상에서 제일 가볍고 강한 재료로 불리우고있으며 유연성도 좋다. 탄소나노관의 당김세기는 45GPa정도로서 강철의 10배이다.

나노관이나 나노선은 직경이 약 1～수십nm이며 길이는 수μm정도이다.(그림 8-25)

탄소나노관은 비록 발전력사가 20a도 안되지만 자기의 독특한 기하학적구조와 특이한 물성, 광범한 응용분야로 하여 21세기 《검은 금강석》으로 불리우고있으며 나노과학기술이 급속히 발전하고있는 오늘날 그것의 합성과 응용에 대한 연구는 나노재료연구의 열점의 하나로 되고있다.

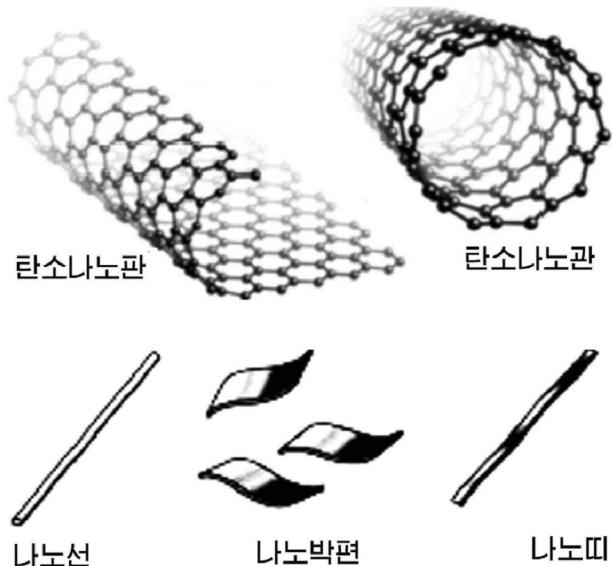



그림 8-25. 탄소나노재료

나노클라스터. 수～수백개정도의 원자와 분자들이 일정한 형식으로 모여 얻어진 나노초미립자를 **나노클라스터**라고 부른다.

나노클라스터에서는 겉면에 놓여있는 원자의 수가 속에 있는 원자의 수와 비슷하거나 더 크다. 나노클라스터의 자기모멘트는 구성하는 원자수(클라스터의 크기)에 따라 심하게 변한다.

나노클라스터는 일반적으로 덩어리물질이지만 원자에서와는 완전히 다른 물리화학적성질을 가지며 그 성질이 크기에 따라 현저히 변화되는 특성을 가진다. 즉 나노클라스터는 크기를 조절하는데 따라서 지금까지 볼수 없었던 기능을 나타낼수 있는 가능성을 가진 물질이다.

나노금속. 금속바탕재료에 여러가지 방법으로 나노립자를 분산시켜 만든 금속재료를 **나노금속**이라고 부른다.

나노금속은 보통금속에서 볼수 없었던 높은 세기와 구부림성, 삭음견딜성을 가질뿐만아니라 수소저장능력이 높고 활성이 강한 전극을 만들수 있는 특수한 성질을 가진다.

나노금속은 구조와 조직을 100nm이하의 크기로 조절하면 같은 계의 합금보다 우월한 특성을 나타낸다.

나노사기. 나노결정립자로 이루어진 나노다결정체나 나노수준에서의 구조조절이 가능한 무기박막 등 종전의 정밀사기에 나노구조조절기술을 도입한 재료를 **나노사기**라고 부른다.(그림 8-26) 이것들은 지금까지 볼수 없었던 초고강도의 기계적성질, 전자기적성질을 가진다.

그림 8-26. 사기미세조직

나노사기는 금속산화물이나 질화물, 탄화물 등의 무기재료구조를 나노급으로 만든것이다.

보통의 정밀사기에서 결정립자의 크기는 0.1～수 μm인데 나노사기에서는 수 nm정도이다.

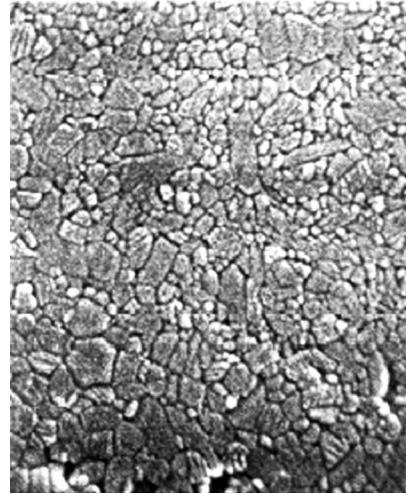
나노재료의 성질

물질이 크기가 작아져 nm크기의 초미립자로 되면 덩어리재료와는 완전히 다른 새로운 성질이 나타난다. 그것은 나노재료가 거시세계와 미시세계사이에 있는 중간세계의 물질이기때문이다.

보통립자의 크기를 100nm보다 작게 하면 녹음점이 낮아지고 증기압이 높아지며 활성이 커지고 기계적성질, 전기 및 자기적성질, 열 및 광학적성질 등의 물리적 성질과 력학적성질들에서 특이한 현상이 나타난다.

우선 나노립자들은 활성이 매우 커진다. 실례로 Cu의 립자반경을 100nm로부터 10nm, 1nm까지 작게 하면 비겉면적(단위질량당 겉면적)은 $6.6m^2/g$, $660m^2/g$까지 증가하며 겉면에네르기는 590J/mol로부터 5 900J/mol, 59 000J/mol까지 증가하여 높은 활성상태에 놓이게 된다. 때문에 나노금속립자들은 공기중에서 폭발적으로 연소되며 촉매효과가 훨씬 높아진다. 립자를 나노화하면 소결온도가 낮아지고 소결속도는 약 10^{12}배나 커진다.

다음으로 립자를 나노화하면 재료의 기계적성질지표가 현저히 높아진다. 실례로 나노동은 일반동보다 세기가 5배 높고 연신률이 5 000％로 매우 좋은 소성을 가지며 경화현상이 없다.

또한 나노재료는 전기적성질도 크게 변한다. 일반동은 전형적인 도체이지만 나노동은 부도체이며 강자성체초미립자들은 나노크기에서 강자성을 잃고 상자성을 나타내며 금속초미립자들은 10nm이하의 크기에서 전기적으로 중간성질을 나타낸다.

그리고 나노립자들은 같은 재질의 거시적인 덩어리물체가 가지지 못하는 새로운 광학적특성을 나타낸다. 금, 은, 동, 석과 같은 유색금속의 나노립자들은 본래의 색을 잃고 검은색을 띤다. 이것은 나노립자의 크기가 빛의 파장보다 작기때문에 생기는 현상이다. 그러므로 나노재료가 검은색을 띠는것은 그것의 첫째 표징이다.

나노립자들은 보임빛에 대한 반사률이 매우 낮다. 백금나노립자의 보임빛반사률은 1%이고, 금나노립자의 반사률은 10%이하이다. 보임빛에 대한 낮은 반사률과 높은 흡수률은 나노금속립자의 크기가 빛의 파장보다 작기때문에 생기는 량자효과이다.

금을 nm크기의 초미립자로 유리속에 분산시키면 맑고 연한 붉은색을 나타낸다. 미세한 금피복은 공예유리의 착색제로 오래전부터 리용되여왔다.

이처럼 나노재료의 성질은 계속 연구되고 리용분야가 늘어나고있다.

문 제

1. 나노동결정의 비열은 일반동의 비열보다 크다는것을 비결면적으로 설명하여라.
2. 나노백금을 촉매로 하면 메틸알콜이 포함되여있는 수용액에서 빛을 쪼여 수소를 생산할수 있다. 어떤 효과를 리용한것인가?
3. 나노립자들의 활성이 커지는것은 결면에 놓이는 원자들의 비률이 증가하기때문이다. 다음의 자료에 근거하여 나노립자의 직경에 따르는 결면원자수의 비률의 변화를 그라프로 표시하여라.

나노립자의 크기 d[nm]	결면원자수	결면원자수 비률 [%]
10	3×10^4	20
4	4×10^3	40
2	2.5×10^2	80
1	30	99

제 10 절. 나노측정

나노기술에서 가장 중요한 기술은 나노크기에 대한 측정기술이다.

나노의 크기는 광학적인 방법으로는 측정할수 없으므로 나노측정기술자체가 고도기술의 종합체이다.

나노측정기술의 기초

나노측정기술에서 중요한 문제의 하나는 우선 나노크기정도의 분해능이다.

현재 길이의 세분화된 눈금에는 인공적으로 길이를 분할한 m눈금자로부터 시작하여 빛의 간섭현상을 리용한 반파장단위의 눈금, X선의 간섭현상을 리용하여 읽을수 있는 결정살창간격의 눈금들이 있으며 길이의 분해능은 이미 나노령역에 들어서고있다.

형태측정의 분해능도 광학현미경, 전자현미경, 주사탐침현미경 등 각이한 측정원리에 기초하여 높아지고있으며 주사탐침현미경에서는 원자의 배렬모양까지 관찰할수 있다.

나노측정기술에서 중요한 문제는 또한 10^{-9}의 측정정확도를 보장하는것이다. 여기서는 회전위치를 수nrad의 걸음으로 미세하게 조절하는것, 길이를 1nm의 정확도로 측정하는 문제가 제기된다.

리상적인 직선운동과 회전운동을 어느 정도 실현할수 있겠는가 하는것은 나노기술로 필요한 물질을 만들어낼수 있는가 없는가 하는 평가척도로 된다.

나노측정기술은 계속 발전하고있다.

나노측정방법

나노크기의 립자들은 광학적수단으로는 볼수 없다. 그것은 립자의 크기가 빛의 파장보다 작은것과 관련된다.

캄캄한 곳에서 눈으로 볼수 없는 거시물체의 겉면을 손으로 만져보면 형태를 알수 있다. 만일 손을 작은 촉각수감부로 바꾸고 시료겉면을 따라 움직이면 접촉으로 겉면을 느끼는 현미경을 만들수 있다.

여러가지 수감부(탐침)를 겉면을 따라 이동(주사)시키면서 눈에 보이지 않는 시료를 관측하는 현미경을 **주사탐침현미경**이라고 부른다.

주사탐침현미경에는 여러가지가 있다.

원자간력현미경(AFM)은 매우 작은 판형수감부(탐침)끝부분의 원자와 시편겉면원자사이에 작용하는 힘에 의하여 생기는 미세변형으로 시료를 관측하는 주사탐침현미경이다.

원자간력현미경에서는 매우 약한 힘의 작용에 의해서도 예민하게 변형되는 극소형판형수감부의 한쪽에 예리한 탐침이 붙어있고 다른쪽 끝은 고정되여있다. 판형수감부탐침끝부분의 원자와 시편겉면원자사이에 작용하는 극히 약한 힘에 의하여 판형수감부에 미세변형이 생기게 된다.

원자간력현미경에서는 이 변형값을 수감하여 시편겉면의 모양에 대응하는 영상을 얻게 된다.

AFM에서 작은 탐침은 《작은 지레대》로, 자극은 지레대에 가해지는 원자간력(원자사이의 힘)으로, 탐침으로 측정되는 응답은 원자간력에 대한 반작용으로 일어나는 《지레대의 변형》이라고 볼수 있다.

주사굴현미경(STM)은 끝이 뾰족한 금속탐침을 시편겉면우에 가까이 가져다대고

탐침과 시편사이에 전압을 걸어줄 때 굴효과(결정경계에서의 자리에네르기 즉 포텐샬장벽의 높이가 립자의 에네르기보다 클 때 미시립자가 이 장벽을 뚫고 지나가는 현상)에 의하여 생기는 굴전류를 리용하여 시편겉면에서의 원자배치상태를 알아내는 주사탐침현미경이다.

주사굴현미경의 탐침으로는 시편겉면의 원자를 직접 볼수 있을뿐아니라 시편겉면의 원자나 분자들을 조작할수 있다.(그림 8-27)

STM과 AFM은 3차원원자분해능을 가진 현미경일뿐아니라 굴전류와 원자사이의 힘을 측정하는 장치로도 리용되기때문에 원자와 분자를 옮기여 자기 의도대로 배렬할수 있다.

이 수단들은 나노기술의 개척기술이므로 탐침을 보다 예민한것으로 바꾸는 방법으로 새로운 현미경을 만들수 있다.

그림 8-27. 우리 나라에서 만든 주사굴현미경

1. 나노측정기술의 기초에 대하여 설명하여라.
2. 원자간력현미경의 구조, 동작원리를 설명하여라.
3. 주사굴현미경의 구조, 동작원리를 설명하여라.

작은 진동자로 나노세계를 느낀다

nm크기의 매우 작은 진동자를 만들수 있다.

그 크기는 원자가 수십~수백개 모인 정도이다. 이렇게 작은 진동자는 한개의 원자와 분자가 부착되여도 <무겁다>고 느끼며 주파수가 낮아지므로 매우 약한 힘을 주파수의 변화로써 나타낼수 있다.

원자간력현미경에서 지레대탐침을 진동자로 교체하고 고체시료의 겉면에 닿지 않게 하면서 가까이 가져가면 진동자와 시료사이에 작용하는 원자들사이의 힘을 주파수변화로 나타낼수 있다. 이러한 현미경은 원자 하나의 질량변화를 느낄수 있는 고감도원자간력현미경이다.

제 11 절. 나노분말제조

나노기술에서 첫번째 공정은 나노재료를 얻는것이다.

나노재료를 어떻게 만들겠는가.

나노재료를 얻는데는 크게 두가지 방법이 있다.

그중의 하나는 큰 덩어리물질을 물리적방법이나 화학적방법으로 미세하게 쪼개거나 분할하는 **미세분할방법**이며 다른 하나는 원자나 분자와 같이 매우 작은 물질들을 쌓아서 만드는 **미세적층방법**이다.

초미세분할기술의 구상

초미세분할기술에 대한 구상은 이미 1950년대에 제기되였는데 큰 덩어리물질을 미세하게 쪼개면 초미립자들로 이루어진 나노물질을 얻는다는것이였다.

지난 시기에는 미세분할방법으로 물질을 1μm정도의 크기로 만드는것을 대단한것으로 여겼지만 지금은 반도체집적회로제작에 쓰이는 빛도형새김기술을 비롯한 여러가지 미세가공기술에 기초하여 나노크기의 물질을 얻고있으며 원자 1개정도의 크기까지 물질을 쪼갤수 있게 되였다.

초미세기술이 발전하여 반도체를 비롯한 전자재료들을 초정밀가공할수 있게 되였으며 현재 나노기술의 매우 중요한 흐름으로 되고있다.

볼분쇄법

볼분쇄할 때 미세화가 형성되는 물림새를 다음과 같이 설명할수 있다.

볼밀기의 회전 또는 진동에 의하여 굳은 볼알은 시료에 대하여 강한 충돌, 연마, 교반을 진행하여 분말들이 반복변형되면서 결합밀도가 높아진다. 결합밀도가 어떤 림계값에 도달하면 국부자름변환구역이 형성되여 굵은 결정내부가 파괴된다. 고에네르기볼분쇄법은 이 과정의 부단한 반복과정이다.

1988년에 어떤 연구사는 처음으로 고에네르기볼분쇄법에 의하여 Al-Fe나노결정재료를 제조하였다.

그러면 고에네르기볼분쇄로 나노결정을 제조할 때에는 어떤 인자와 조건을 조절해야 하는가.

우선 구의 재질을 불수강볼, 유리볼, 경질합금볼 등에서 정확히 선택하여야 한다.

다음으로 볼분쇄온도와 시간을 조절하여야 한다. 그리고 원료는 마이크로급의 분말 또는 작은 크기의 띠쪼각편을 리용하여야 한다.

이와 함께 볼분쇄과정에 미립자의 크기성분과 구조변화는 X선분석, 전자현미경관찰로 자주 감시하여야 한다.

고에네르기볼분쇄법을 리용하면 어떤 점이 좋은가.

고에네르기볼분쇄법으로 순금속나노결정을 얻을수 있다.

고에네르기볼분쇄법을 리용하여 호상 융합되지 않는 몇가지 원소들로 고용체도 제조할수 있다. 실례로 립자의 크기가 100㎛보다 작거나 같은 Fe, Cu분말을 볼분쇄기에 넣고 Ar기체분위기에서 8h이상 볼분쇄하여 결정립도를 수십nm로 줄이면 Fe-Cu합금분말이 생긴다. 또한 Ag와 Cu는 방안온도에서는 거의 서로 융합되지 않지만 혼합분말을 25h동안 볼분쇄하면 결정립도의 크기가 10nm인 고용체를 얻는다.

고에네르기볼분쇄법을 리용하여 나노금속간화합물을 제조할수 있다. 일반적으로 높은 녹음점을 가지는 원소들의 금속간화합물을 만드는것은 어렵다. 현재까지 Fe-B, Ti-Si, Ni-Mo, Ni-Zr 등과 같은 10개이상의 나노금속간화합물을 제조하였다. 실험결과 일부 합금계의 어떤 성분범위내에서 볼분쇄과정에 중간상으로 나노금속간화합물이 생겨난다.

고에네르기볼분쇄법은 또한 나노복합재료를 제조하는 효과적인 방법으로도 된다. 이 방법으로 금속과 나노산화물, 나노탄화물을 함께 복합하여 특이한 성질을 가진 나노복합재료를 얻을수 있다.

기상법

전형적인 나노미립자제조방법은 1963년에 제기된 기상응축법이다. 이 방법으로는 순수한 드문기체속에서 증발과 응축과정을 통하여 비교적 순수한 나노미립자를 얻을수 있다.

장치는 0.1Pa이상의 진공도를 보장하며 여기에 2kPa정도의 저압의 순수한(He이나 Ar, 순도는 ～99.999 6%) 드문기체를 채워넣는다. 증발시키려는 물질을 도가니에 넣고 가열장치로 점차 가열하여 증발시키면 연기형태의 물질이 생긴다. 증발된 물질은 우로 이동하여 액체산소가 차있는 랭각기에 접근하여 핵이 형성되고 원자클라스터가 생기며 나노미립자로 된다.

기상응축법에서는 드문기체의 압력, 증발물질의 분압 즉 증발온도와 증발속도

자료 **나노립자제조방법의 분류**

지난 시기 일반적으로 나노립자제조방법을 물리적방법과 화학적방법으로 나누었다. 흔히 액상법과 기상법은 화학적방법으로, 기계적인 분쇄법은 물리적방법으로 보았다.

그런데 일부 기상법들은 초미립자를 제조하는 과정에 화학반응이 진행되지 않기때문에 화학적방법이라고 부르는것은 적합치 않은 반면에 기계적분쇄법에서 기계적합금화방법은 각이한 종류의 초미립자들이 혼합되면서 금속간화합물을 형성하면서 화학반응이 일어나기때문에 완전히 기계적방법이라고 하는것도 적당치 않다.

따라서 나노립자제조방법을 기상법과 액상법, 고에네르기볼분쇄법 등 기술수법에 따라 분류하기도 한다.

또는 드문기체의 온도를 조절하여 나노미립자의 직경을 조절할수 있다.

액상법

나노미립자제조방법에는 화학반응이 동반되는 여러가지 액상법이 있다. 그중에서 **침전법**은 다음과 같다.

한 종류 또는 여러 종류의 이온을 포함한 가용성(물에 풀리는)용액에 침전제를 첨가하거나 일정한 온도에서 물분해하면 불용성(물에 풀리지 않는)수산화물, 수화산화물 또는 염류가 용액으로부터 석출된다. 이때 용매와 용액속에 원래 있던 음이온이 없어진다. 이것을 열분해 또는 탈수시켜 필요한 산화물분말원료를 얻는다.

침전법에는 공침법, 균일상침전법 등이 있다.

이외에도 액상법에는 분무법과 수열법, 용매휘발분해법, 졸-겔법, 방사선화학합성법 등이 연구되여 리용되고있다.

문 제

1. 나노분말제조방법을 제조원리에 따라 분류하여라.
2. 나노분말제조과정의 실례를 3가지이상 참고자료에서 찾아내여 설명하여라.
3. 고에네르기볼분쇄법에 대하여 설명하여라.

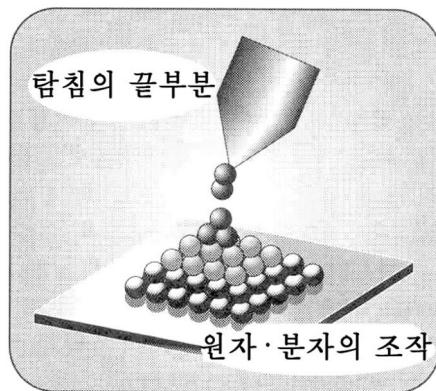
제 12 절. 나노박막제조

나노재료제조기술의 보다 높은 단계는 초미세적층기술이다.

초미세적층기술은 원자나 분자를 어떤 프로그람에 따라 배렬할 때 희망하는 물질을 만들어낼수 있다는 가정에 기초한 기술이다.

초미세적층방법은 원자나 분자를 물리적 및 화학적방법으로 반응시켜 적층시킨다.(그림 8-28)

그림 8-28. 미세적층방법

전자묶음이나 레이자빛을 물질에 쪼여주면 분해증발되여 작은 미립자나 박막이 얻어진다. 이러한 방법들을 비산법, 레이자빛쪼임법이라고 말한다.

물리적방법에 의한 나노박막제조

나노박막은 2차원나노재료로서 단일나노박막과 나노복합박막으로 나눌수 있다.

나노박막은 나노재료와 박막재료의 우점을 다같이 가지므로 그 특성이 매우 좋다.

나노박막제조는 기판재료의 겉면우에 다른 물질의 원자나 분자를 쌓아 나노두께의 박막을 만드는 처리기술이다.

나노재료를 원자나 분자를 쌓는 방법으로 제조하려면 물질을 원자나 분자로 분할하는 방법과 그것을 조절하여 쌓는 방법이 동시에 리용되여야 한다.

음극비산법에서는 우선 낮은 압력의 드문기체속에서 기체방전이 일어날 때 양이온이 음극을 타격하여 음극의 물질을 원자나 분자단위로 떼여낸다. 다음에 이 물질을 기판으로 되는 물질의 겉면에 고르게 응결시켜 박막으로 되게 한다.

겉면에 분자와 원자들이 박막을 형성하는 과정을 따져보자.

원자나 분자들은 기판겉면에 날려와 약간씩 이동되면서 흡착된다. 이때 원자들은 겉면에 강하게 결합되거나 에네르기적으로 유리한 자리를 찾아 이리저리 이동하거나 떨어져나갈수 있다.

이동하는 흡착원자들이 서로 만나게 되면 기판겉면에 작은 모임을 형성하고 다른 흡착원자들을 더 많이 끌어들이면서 막을 형성한다.

이 과정은 기판재료와 겉면, 쌓이는 원자에 일정한 조건을 지어주면 《자체로 나노박막화》가 실현될수 있다는것을 보여준다.

비산법을 리용하여 각이한 금속겉면에서 분리한 원자들을 층상으로 침전시키면 수백층의 층상구조를 가지는 나노복합층상재료를 제조할수 있다. 매 층의 두께는 0.2nm이다.

자기마당비산법으로 탄소강겉면에 만든 나노복합박막($MoSI_2$-SiC)은 500℃에서 1h동안 열처리하면 경도가 20.8GPa로 커지는데 이것은 탄소강보다 수십배 크고 내열성과 내산화성이 좋다.

나노박막재료는 고강도, 고경도이면서 질김성이 좋으므로 전망이 크다.

자연에서 초미세적층기술

초미세적층기술은 허황한 환상이 아니라 사실상 사람들의 몸안에서 일상적으로 일어나고있다.

몸안에서는 DNA의 생명설계도에 따라 세포막, 단백질, 올리고당이라는 물질들이 만들어지고있다. 이러한것들은 자연적인 프로그람에 따라 만들어지고있다. 이와 같이 얼핏 보면 실현될수 없는 환상과 같은 나노기술은 생물세계에서는 아주 자연스럽게 진행되고있다.

이것을 사람들의 일상생활과도 비유해볼수 있다.

일반적으로 사람들은 천을 사서 몸에 맞게 재단가공하여 옷을 입지만 매미의 탈피를 옷이라고 하면 천으로 만든것이 아니라 《원자들을 련결하여》 만든것이다.

이러한 생물의 《프로그람적자체조직화》라는 방법은 다양한 재료의 제조에 리용한다.

화학적방법에 의한 나노박막재료

나노박막을 화학적으로 제조하는 방법에는 화학용액법과 화학기상침적법(CVD)이 있다.

화학용액법은 먼저 유기금속과 무기염화합물을 선택하여 용액(졸)을 제조하고 기판을 거기에 넣은 다음 일정한 속도로 끌어올려 용액(졸)이 기판에 부착되도록 하여 나노금속막을 얻는 방법이다. 금속막을 제조하려면 환원처리단계를 거쳐야 한다.

화학기상침적법은 화학적방법으로 얻은 나노립자들을 일정한 압력의 드문기체속에서 기판우에 분사시켜 막을 형성하는 방법이다.

여러가지 기체를 높은 온도에서 화학반응시키는 방법을 화학기상성장법(CVD법)이라고 한다. 아세틸렌이나 벤졸과 같은 탄화수소를 금속미립자촉매를 리용하여 높은 온도에서 화학반응시키면 탄소나노관이 얻어진다.

액체상태로부터 고체를 석출시키는 방법도 있는데 졸상태의 액체를 건조시키고 겔화하여 합성하는 방법을 졸-겔법이라고 한다. 이 방법은 나노사기와 나노유리합성에서 많이 리용되고있다.

나노물질의 합성에서는 크기와 형태를 잘 조절하여 될수록 많은 량을 합성해내는것이 중요한 문제이다.

특히 어떤 최적합성조건에서 나노구조가 자체로 성장하는 자체조직화기술을 개발하는것이 중요하다.

※ 《자체조직화》는 환경에 적응되여나가는 과정으로서 나노물질이 가지고있는 성질에 따라 자체로 배렬되여 구조를 만드는 현상이다.
실례로 뼈는 자체조직화에 따라 이루어진다고 본다.

문 제

1. 나노박막과 일반박막의 차이점은 무엇인가?
2. 나노박막제조방법의 실례를 들어보아라.
3. 나노박막의 종류를 들고 그 우점을 밝혀라.

제 13 절. 나노기술의 응용

나노재료의 응용

나노재료들은 인민경제 여러 부문과 우리 생활에 광범히 리용되게 된다.

다층탄소나노관을 리용하면 손바닥만 한 천연색TV를 제작할수 있다. 또한 탄소나노관에 많은 량의 수소를 흡착시키면 전기자동차의 동력원천으로 널리 리용할수 있

다. 그리고 나노탄소원뿔결면에는 Pt촉매가 잘 분산되기때문에 소형수소연료전지의 전극재료로 리용할수 있다. 이러한 연료전지들이 연구개발되면 전자장치들을 수소와 알콜을 에네르기원천으로 하여 동작시키게 될것이다. 탄소나노관과 같이 가볍고 강한 재료들은 앞으로 우주비행선과 같은 대상의 구조재료로 리용할수 있다.

플러렌은 내부에 여러개의 금속원자가 들어갈만 한 공간을 가지고있으므로 불안정한 원자도 플러렌내부에 갇혀지면 껍질의 작용으로 안정하게 유지된다.

C_{60}플러렌은 빛을 받으면 특정한 부위만을 절단하는 작용을 하므로 나노빛수술칼로서 의료부문에서 쓸수 있다.

나노금속은 보통금속과 달리 세기가 크고 내열특성이 매우 좋으므로 기계구조용 부분품, 색류선륜, 구부림성이 좋은 안경테를 만들어내고있다.

사기의 구조조직을 나노화하면 휴대용전화기에 들어가는 축전기도 유전체층을 보다 얇게 함으로써 극소형화, 경량화할수 있다. 이것을 리용하여 손목시계만 한 휴대용무선TV전화기와 같은 정보전자장치의 극소형화를 실현할수 있다.

유리재료에 나노기술을 적용하여 만든 나노유리는 취성이 약하고 가볍기때문에 태양전지용유리기판과 자기디스크, 빛디스크의 기판으로 리용할수 있다. 또한 자동차, 기차, 건물의 창문유리를 비롯하여 에네르기, 환경, 정보 등 넓은 분야에서 리용할수 있다.

μm크기의 미세한 립자겉면에 나노립자를 부착시키면 분말로서의 새로운 성질이 나타나는데 이러한 립자는 부풀지도 않고 줄어들지도 않으며 류동성이 전혀 없는 분말로 된다.

공학분야에서의 응용

정보기술분야에서의 응용. 정보기술분야에서 나노기술이 중요시되는 점을 3가지로 들고있다.

첫째로는 초고집적의 가능성이고 둘째로는 량자효과의 효과적인 리용이며 셋째로는 기능조화집적을 할수 있다는것이다.

실례로 초고집적기술의 종국적인 목표로 되는것이 원자기억소자이다. 원자기억소자의 실례로서 잘 알려져있는것은 도서관을 단 한개의 각사탕안에 집어넣게 된다는것이다. 즉 도서관에 보관되여있는 정보를 사방 1cm의 각사탕만 한 크기의 기억소자에 모두 저축하는 기술이다.

또한 량자효과를 리용하여 전자기구를 발전시켜나갈수 있다. 물질의 크기가 나노크기로 작아질수록 그의 에네르기준위가 띠염띠염 갈라지게 되는 량자효과도 볼수 있다. 나노립자에서는 그안에 갇히운 전자의 에네르기준위의 간격이 넓어지는데 이 효과를 리용하여 푸른색이나 자외선의 레이자를 발생시키는 기술을 개발하고있다.

그리고 기능을 조화시킨 집적을 할수 있다. 이것은 작은 장소에 같은것을 고밀도로 오직 많이 넣기만 하는 초고집적과는 달리 원자, 분자들을 무어나가 여러가지 다른 기능들을 조화시켜 기구를 만든다는것이다.

결국 실례를 들면 사람의 눈과 같이 빛을 느끼는 기능과 그것을 처리하는 기능이 합쳐진것을 만드는 일이 nm의 규모에서 가능하게 된다는것이다.

또한 5감정보통신도 가능하다. 현재의 정보통신은 음성과 화상에 머무르고있지만 지적수감장치로 전달하려는 냄새나 맛을 수감하여 그 스펙트르정보를 상대방에게 전기신호로 보내여 정보를 받는 사람의 냄새를 느끼는 뇌의 부분을 자극하거나 맛을 느끼는 부분을 자극할수 있게 된다면 5감으로 얻어낸 정보를 멀리에 있는 상대방에게 전할수 있다.

광학분야에서의 응용. 사람은 정보의 70%이상을 시각 즉 빛을 통하여 얻고있다. 이것은 사람이 정보를 얻는것과 빛과의 밀접한 관계를 반영하고있다.

지금 빛기술도 나노규모에서 관찰하거나 조종하는것이 중요시되고있으며 나노빛량자기술이 고도정보화를 달성하기 위한 중요한 열쇠로 된다고 보고있다.

빛량자기술은 곧 빛기술이다. 정보통신의 광대역화가 빛통신에 의하여 촉진되는 현실은 지금까지 전자기구에서 진행되여온 일들이 모두 빛에 의한 장치로 진행되여야 하므로 새로운 나노구조빛량자기술재료를 개발하는것이 정보통신분야의 과제로 나서고있다.

통신전파의 주파수는 라지오가 kHz, TV가 MHz, 휴대용전화기는 GHz로서 이보다 더 높은것으로 이행되고있는데 현재는 THz령역에 들어서고있다. 이것은 주파수가 높을수록 더 많은 정보를 전할수 있기때문이다. 그리하여 고주파수의 전자기

반도체나노소자

한 변의 길이가 1cm정도인 반도체소편에 만들어진 대규모집적회로(LSI)는 반도체기판에 만들어진 미세한 전자요소(스위치작용을 하는 3극소자)들과 이 요소들을 련결하는 배선으로 구성된 많은 전자회로의 집합체이다. 2001년 약 4 000만개의 반도체3극소자가 집적된 LSI가 광범히 리용되였다.

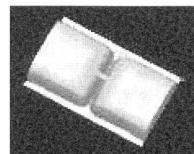



그림 8-29
단전자 3 극소자

나노기술을 리용하면 3극소자의 집적도를 비약적으로 높일수 있다. 여기서 중요한것은 3극소자의 크기와 함께 동작에 필요한 전자의 수를 적게 하는것이다.

LSI에서는 한번의 동작에 3극소자 1개당 약 10만개의 전자가 흐른다.

그러나 나노기술을 리용한 단전자3극소자는 전자 1개로 소자를 동작시킨다. 이러한 단전자3극소자 2개를 조합한 역변환기회로가 콤퓨터나 원자간력현미경에 리용되고있다. 이 소자는 종전소자에 비하여 전력소비가 대단히 작고 동작속도가 비할바없이 빠르다.

파가 요구되고있는데 지금까지의 THz주파수의 전자기파발생장치로서는 미약한것밖에 발생시킬수 없었다. 이것이 나노빛량자기술의 연구를 촉진시켰으며 fs(10^{-15}s)급의 레이자빛을 쪼이면서 반도체 같은데 전류를 흘려보내면 효률이 높은 THz급의 전자기파가 발생한다는것이 알려지게 되였다.

문 제

1. 정보기술분야에서 나노기술의 응용을 례를 들어 설명하여라.
2. 광학분야에서 나노기술의 응용을 례를 들어 설명하여라.
3. 탄소나노재료의 응용실례를 과학잡지에서 3가지이상 찾아보아라.

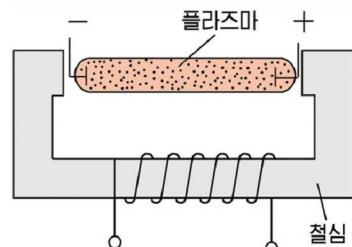
문제. 여러가지 과학잡지들을 읽고 나노재료의 응용실례를 종합하여보아라.
나노재료의 성질을 리용할수 있는 경우를 자체로 착상하여라.

방향.
- 잡지《학생과학》,《대학생》,《대중과학》,《나노재료》에서 필요한 제목들을 선정하여라.
- 리용된 나노재료들의 특성에 따라 분류하여라.
- 새로운 응용을 생각하여보아라.

복습문제

1. 플라즈마를 물질의 네번째 상태라고 부르는데 이 상태를 다른 상태들과 비교하여라.
2. 어떤 금속구속에 대전된 립자들로 이루어진 플라즈마를 가득 채웠다. 금속구밖에서 이 플라즈마가 만드는 전기마당의 세기는 얼마인가?
3. 유리관속에 플라즈마기둥이 있다. 이 유리관을 자기유도가 빨리 증가하는 전자석속에 그림 8-30과 같이 가져가면 어떤 현상이 일어나겠는가?

그림 8-30

4. 찬빛을 내는 물질에서 활성원자는 어떤 작용을 하는가?
5. 만일 활성원자가 양이온처럼 행동하면 어떻게 되겠는가?
6. 찬빛에서 스톡스의 법칙이 성립하는 리유를 밝혀라.
7. 레이자빛이 자연빛과 다른것은 무엇인가?

8. 레이자빛을 어떻게 증폭하는가?
9. 레이자빛의 특성을 말하고 교과서에 알려주지 않은 실례를 찾아보아라.
10. 초전도체의 특성을 들고 새로운 미래의 리용실례를 구상하여보아라.
11. 초전도상태의 쌍전자로 어떤 초전도현상을 설명하지 못하는가?
12. 결정체에 초고압을 가하면 전도성이 점차 좋아지는 원인을 에네르기띠로 설명하여라.
13. 미시립자들인 전자, 핵자들의 물질파의 파장을 nm로 표시하고 나노립자의 크기와 대비하여라.
14. 플러렌과 나노탄소의 구조에서의 차이와 성질에서의 차이를 밝히여라.
15. 나노금속립자의 빛에 대한 반사률이 1%이하이다. 나노금속은 어떤 색을 띠는가?
16. 주사굴현미경과 원자간력현미경의 구조, 동작원리, 측정방법에서의 공통점과 차이점을 대비하여 설명하여라.

실 험

실험 1. 유리의 굴절률 결정

목적. 이 실험에서는 평행평판유리를 지나는 빛의 굴절현상을 리용하여 유리의 굴절률을 측정한다.

기초지식. 평행평판유리의 웃면에 입사한 빛선과 굴절한 다음 아래면으로 나가는 빛선은 평행이다.(그림 1)

그림 1. 평행평판유리를 지나는 빛의 굴절

유리의 두께를 d, 굴절빛이 입사빛에 비해 어긋나는 거리를 a라고 할 때

$$a = \mathrm{OC}\sin(\alpha-\gamma) = \frac{d\sin(\alpha-\gamma)}{\cos\gamma} \qquad (1)$$

의 관계가 선다.

우의 식을 전개하면 빛선이 어긋나는 거리는 다음과 같다.

$$a = d\sin\alpha\left(1-\frac{\cos\alpha}{\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}\right) \qquad (2)$$

즉 빛선이 어긋나는 정도는 두께 d가 클수록, 입사각 α가 클수록 커진다.

식 2로부터 유리의 굴절률은 다음과 같다.

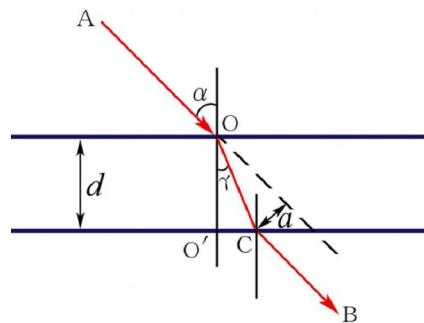
$$n = \sqrt{\left(\frac{\cos\alpha}{1-\frac{a}{d\sin\alpha}}\right)^2 + \sin^2\alpha} \qquad (3)$$

식 3으로부터 입사각 α, 유리의 두께 d, 굴절빛선의 어긋나는 거리 a를 측정하면 유리의 굴절률 n을 결정할수 있다.

기구 및 재료. 기하광학대(광원, 하나의 실틈이 있는 가림판, 평행평판유리, 둥근 모양의 각도눈금판, 받침대, 고정틀 2개), 흰종이, 자, 연필, 분도기

그림 2. 유리의 굴절률측정장치

실험방법

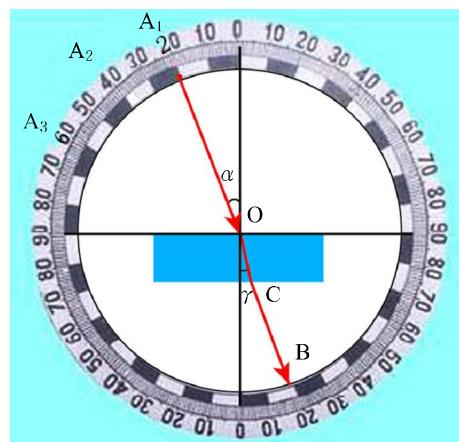
1) 그림 2와 같이 실험기구를 설치한다. 각도눈금판우에 그보다 반경이 작은 흰종이를 올려놓고 각도눈금판의 두 축과 일치하도록 수직인 두 선을 긋는다.

2) 유리판의 두께 d를 측정한 다음 흰종이의 한 직선에 유리판의 웃면이 일치되게 유리판을 설치하고 아래부분을 연필로 직선을 그어 표시한다.

3) 광원의 입사빛선이 A_1O방향(입사각 $\alpha = 20°$)으로 향하도록 한 다음 유리판의 밑에서 굴절되여나오는 빛선우에 두 점을 찍는다.(그림 3)

4) 유리판을 치우고 굴절빛선의 두 점을 맺어 직선 CB를 얻는다.

5) 입사빛선 A_1O에 연장선을 그어 굴절빛선의 어긋나는 거리 a를 자로 잰다. 그리고 C와 O점을 연필로 긋고 분도기로 굴절각 γ를 측정한다.

그림 3. 입사각에 따르는 굴절빛선

6) 유리판을 다시 올려놓고 입사빛선이 A_2O(α=40°), A_3O(α=60°)인 경우에 각각 실험 3~5의 과정을 반복하여 α와 γ를 측정한다.

결과 및 분석

1) 굴절각 γ를 분도기로 측정한 경우 굴절법칙을 리용하여 유리의 굴절률을 계산하고 그의 평균값, 절대오차, 상대오차를 구한다.

실험번호	입사각 α	굴절각 γ	$\sin\alpha$	$\sin\gamma$	$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$
⋮					

2) 입사빛선과 굴절빛선이 어긋나는 거리 a와 두께 d, 입사각 α를 다음의 표에 기록하고 식 3에 의하여 유리의 굴절률 n을 계산하고 그의 평균값, 절대오차, 상대오차를 구한다.

실험번호	입사각 α	두께 d[cm]	어긋나는 거리 a [cm]	$\sin\alpha$	$\cos\alpha$	n
⋮						

3) 우에서 두가지 방법에 의하여 얻은 굴절률값을 비교하고 오차원인을 밝힌다.

과 제

1. 입사빛선 AO와 유리를 통한 굴절빛선 CB(그림 1)가 평행이라는것을 증명하여라.
2. 광원을 쓰지 않고 바늘 4개, 자, 연필, 분도기를 가지고 유리의 굴절률을 결정하는 방법을 창안하여라.

실험 2. 유리의 림계각 측정

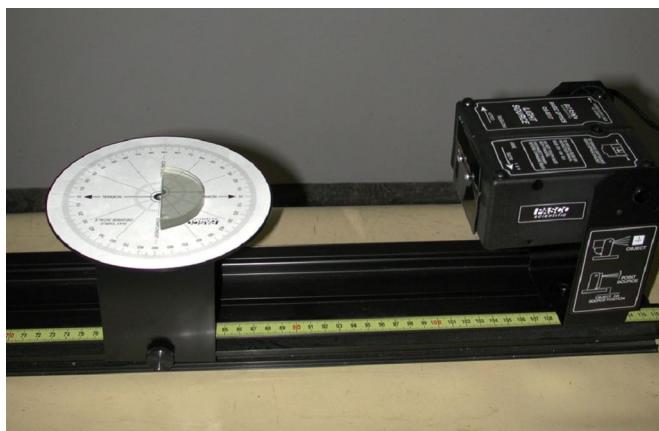
목적. 이 실험에서는 유리의 전반사림계각을 측정한다.

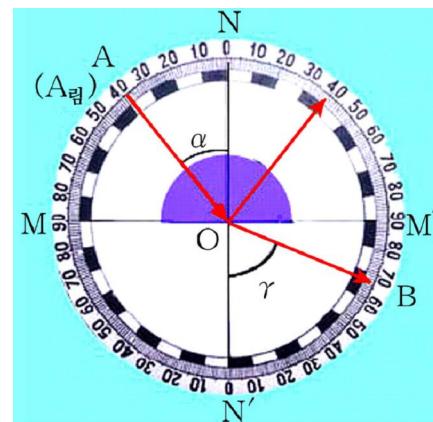
기초지식. 유리속에서 공기속으로 빛이 굴절될 때의 유리의 굴절률을 n, 입사각과 굴절각을 각각 α, γ라고 할 때 굴절법칙은 다음과 같다.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{1}{n} \tag{1}$$

굴절각이 90° 인 때 림계각을 $\alpha_{\text{림}}$이라고 하면 림계각의 시누스는 다음과 같다.

$$\sin\alpha_{\text{림}}=\frac{1}{n} \tag{2}$$

이로부터

$$\sin\alpha_{\text{림}}=\frac{1}{n}=\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} \tag{3}$$

의 관계가 성립하므로 입사각과 굴절각의 시누스비를 측정하면 림계각을 결정할수 있다.

기구 및 재료. 기하광학대(광원, 한개 실틈이 있는 가림판, 반원형의 유리판, 각도눈금판, 받침대, 고정틀 2개, 직3각프리즘), 흰종이, 분도기, 연필

실험방법

1) 그림 4의 ㄱ와 같이 기구를 설치한다.

(1) 광원앞에 실틈이 있는 가림판을 설치한다.

(2) 받침대우에 각도눈금판을 올려놓고 그우에 흰종이를 원형으로 잘라 올려놓는다.

(3) 각도눈금판의 축과 일치되도록 흰종이우에 수직인 두 직선 NN′, MM′를 긋고 사귐점 O를 찍는다.(그림 4의 ㄴ)

ㄱ)

ㄴ)

그림 4. 유리의 전반사림계각측정

(4) 흰종이우에 반원형유리판의 중심이 점 O와 일치하고 직경부분이 직선 MM′와 일치하도록 반원형유리판을 올려놓는다.

2) 종이우에 입사각 $\alpha=\angle AON=20°$ 되는 점 A를 찍고 광원으로부터 나오는 빛선은 AO와 일치되게 비쳐준다.

3) 유리와 공기의 경계면에서 굴절빛선이 나가는 자리에 점 B를 표시한 다음 분도기로 굴절각 $\gamma=\angle BON'$를 측정한다.

4) 입사각이 각각 30°, 40° 인 경우 실험 2～3의 과정을 반복하여 굴절각을 측정한다.

5) 다음에는 입사각을 점차 크게 하면서 반사하는 빛의 밝기가 어떤가를 확인한다. 그리고 굴절각이 90°로 되는 입사점 $A_{림}$을 찍고 림계각 $\alpha'_{림}=\angle A_{림}ON$을 분도기로 측정한다.

6) 실험 5의 과정을 3회 반복한다.

결과 및 분석

실험 번호	입사각 α	굴절각 γ	$\sin\alpha_{림}=\dfrac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$	$\alpha_{림}$	굴절각이 90° 인 때의 림계각 $\alpha'_{림}$
⋮					

1) 측정값을 다음의 표에 기록하고 림계각을 구한다.

2) $\alpha_{림}$, $\alpha'_{림}$값의 평균값, 절대오차, 상대오차를 각각 계산하고 비교한다.

3) 입사각이 점차 커짐에 따라 반사빛의 밝기가 어떻게 변하는가 밝힌다.

과제

1. 실험에서 유리판을 180° 돌려놓고 실험하여도 전반사가 일어나는가? 왜 그런가?

2. 실험에서 구한 전반사림계각을 생각하면서 그림 5와 같이 빛이 입사할 때 프리즘을 지난 빛의 경로를 실험으로 확증하고 어디에 리용하겠는가를 설명하여라.

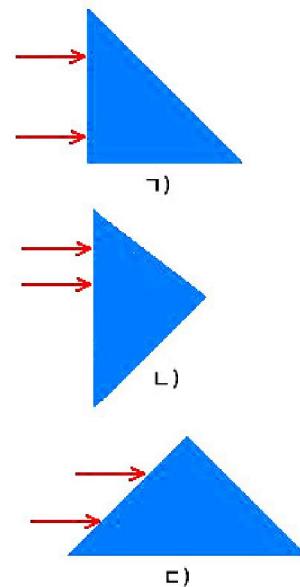



그림 5. 삼각프리즘에서의 전반사

실험 3. 볼록렌즈의 초점거리 측정

목적. 이 실험에서는 렌즈의 공식을 리용하여 얇은 볼록렌즈의 초점거리를 측정한다.

기초지식. 렌즈의 공식 $\frac{1}{a}+\frac{1}{b}=\frac{1}{f}$ 로부터 볼록렌즈의 초점거리를 구할수 있다. 즉

$$f=\frac{ab}{a+b} \tag{1}$$

그리고 물체의 크기를 h, 영상의 크기를 h'라고 하면 $\frac{b}{a}=\frac{h'}{h}$ 이므로

$$f=b\frac{h}{h+h'} \tag{2}$$

에 의하여 b, h, h'를 측정하면 f를 구할수 있다.

렌즈의 초점거리를 비교적 정확히 재는 방법은 다음과 같다.

물체와 영상까지의 거리 L이 $4f$ 보다 클 때 물체와 비춤판을 고정하고 렌즈를 비춤판쪽으로 움직이면 비춤판에는 영상이 두번 생긴다.

처음 렌즈가 A에 있을 때에는 확대된 실영상이 맺힌다.(그림 6)

그림 6. 물체와 비춤판을 고정한 경우 영상

다음 렌즈가 점 A로부터 d만큼 떨어진 점 B에 있을 때에는 축소된 실영상이 맺힌다. 우의 두 경우에 대하여 렌즈의 초점거리를 구하면 다음과 같다.

$$f=\frac{L^2-d^2}{4L} \tag{3}$$

이로부터 L, d를 측정하면 f를 구할수 있다.

기구 및 재료. 기하광학대(f =10cm인 볼록렌즈, 광원, 화살모양의 실틈판, 고정틀 3개, 비춤판), 자, 전원(12V)

실험방법

1) a, b, h, h'에 의한 초점거리 측정

(1) 광원에 실틈을 끼우지 않은 상태에서 전등을 켜고 그앞에 볼록렌즈를 놓고 뒤에 비춤판을 움직이면서 렌즈의 초점거리를 대략적으로 잰다.

(2) 광원에 화살모양의 실틈판을 끼우고 렌즈, 비춤판을 그림 7과 같이 설치한다.

(3) 물체(화살모양의 실틈판)를 렌즈로부터

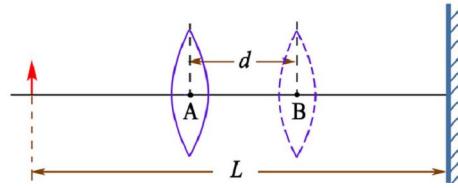
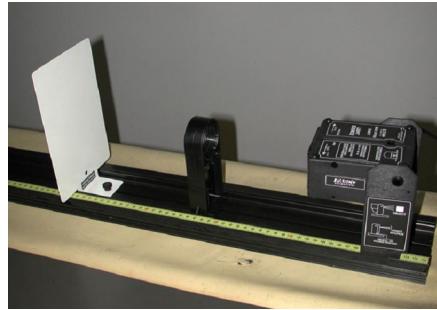



그림 7. 볼록렌즈의 초점거리 측정장치

대략적으로 잰 초점거리보다 약간 멀리에 놓이도록 고정하고 비춤판을 옮기면서 화살의 선명한 영상이 맺히는 자리를 찾는다.

(4) 렌즈로부터 물체까지의 거리와 영상까지의 거리 그리고 물체의 크기(높이)와 영상의 크기를 측정한다.

(5) 물체까지의 거리 a를 변화시키면서(렌즈로부터 멀리) 같은 실험을 3회이상 반복한다.

2) L과 d에 의한 초점거리측정

(1) 물체로부터 비춤판사이거리 L을 $4f$ 보다 조금 크게 정하고 물체와 비춤판을 고정한다.

(2) 볼록렌즈를 물체로부터 점차 비춤판쪽으로 옮기면서 비춤판에 화살의 선명한 커진 영상이 나타나는 볼록렌즈의 자리 A를 표시한다.

(3) 볼록렌즈를 계속 비춤판쪽으로 옮기면서 두번째로 나타난 선명한 작아진 영상의 자리 B를 표시하고 AB사이거리 d를 잰다.

(4) L을 변화시키면서(크게) 같은 실험을 반복한다.

결과 및 분석

1) a, b, h, h'측정값들을 다음의 표에 기록하고 식 1, 2에 의하여 초점거리를 계산한 다음 그의 평균값, 절대오차, 상대오차를 각각 구하고 서로 비교한다.

실험번호	a[cm]	b[cm]	$f=\frac{ab}{a+b}$	물체의 크기 h[cm]	영상크기 h'[cm]	$f=b\frac{h}{h+h'}$
⋮						

2) L과 d에 의한 측정값들을 다음의 표에 기록하고 식 3에 의하여 초점거리를 구한 다음 그의 평균값, 절대오차, 상대오차를 계산하고 우에서 측정된 값들과 서로 비교한다.

실험번호	L[cm]	d[cm]	f[cm]
⋮			

3) 실험에서 얻은 결론과 느낀 점을 쓴다.

과 제

1. 확대된 영상과 축소된 영상을 맺히게 하는 두 렌즈의 자리 A와 B는 물체와 비춤판사이의 중심에 대하여 어떤 위치에 있는가?
2. 볼록렌즈와 오목렌즈가 있다. 어느것의 배률이 더 크겠는가를 다른 기구의 도움이 없이 결정하여라.
3. 볼록렌즈는 빛을 헤쳐지게 하고 오목렌즈는 빛을 한 점에 모이게 할수 없겠는가? 그 방도를 찾아보아라.
4. 식 3을 유도하여라.

실험 4. 에돌이살창에 의한 빛의 파장 측정

목적. 이 실험에서는 에돌이살창으로 빛의 에돌이간섭무늬를 얻어 단색빛의 파장을 측정한다.

기초지식. 에돌이살창에 평행빛선이 살창면에 수직으로 입사할 때 살창틈에서 에돈 빛은 비춤판에 간섭무늬를 만든다.(그림 8)

이때 에돌이각을 θ, 살창상수를 d라고 하면 간섭의 극대조건은 다음과 같다.

$$d\sin\theta = k\lambda \quad (1)$$

그림 8. 에돌이살창에서 빛의 에돌이

k =0이면 점 O에 령차주극대가 생기고 차수가 커짐에 따라 에돌이극대의 세기가 점차 약해진다.

에돌이살창에서 비춤판까지의 거리를 L, 령차주극대점 O로부터 k차주극대까지의 거리를 y라고 하면 $L \gg y$이므로

$$\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{y}{L} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{dy}{kL} \quad (3)$$

의 관계가 성립한다. 이로부터 살창상수 d를 알고 L과 y 그리고 차수 k를 측정하면 λ를 구할수 있다.

기구 및 재료. 에돌이살창(살창상수 d가 이미 주어진것), 가운데에 실틈이 있는 눈금자(여기에 검은 두개의 이동고리가 있다.), 자, 고정대 3개, 광원, 빛거르개(붉은색, 풀색, 보라색)

실험방법

1) 그림 9와 같이 실틈판으로부터 L(1m정도)만큼 떨어진 곳에 에돌이살창을 설치한다. 실틈판뒤에는 광원을 놓고 거기에 붉은색빛거르개를 끼워놓는다.

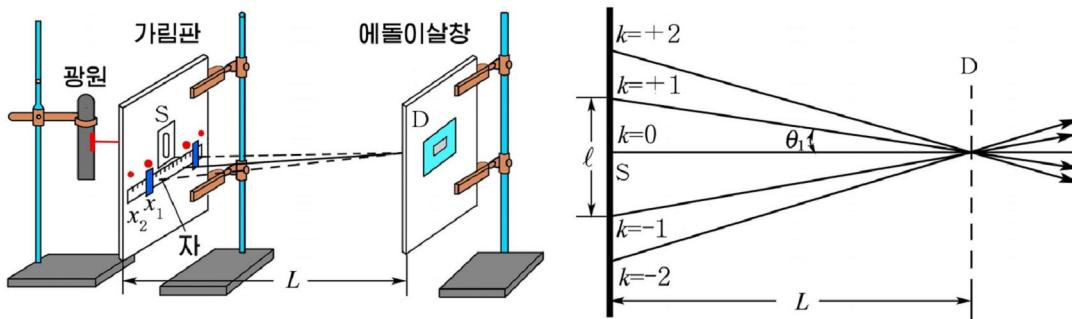



그림 9. 에돌이살창에 의한 파장측정장치

2) 광원을 켠 다음 에돌이살창을 통하여 에돌이무늬를 관찰한다.

3) 실틈의 좌우측에 나타난 ±1차극대에 각각 이동고리를 맞추어놓고 그사이거리 l을 측정한 다음 실틈중심과 에돌이살창중심사이거리 L을 측정한다.

4) 계속하여 ±2, ±3차극대자리로 이동고리를 옮겨 그 사이거리 l을 측정한다.

5) 붉은색빛거르개를 뽑고 풀색, 보라색빛거르개를 각각 끼워놓은 경우에 실험3~4의 과정을 반복한다.

결과 및 분석

1) 측정값들을 다음의 표에 기록하고 파장을 결정한 다음 평균값, 절대오차와 상대오차를 구한다.

색	차수 k	l[mm]	$y=\frac{l}{2}$	L[mm]	$\lambda=\frac{dy}{kL}$	$\bar{\lambda}$ [μm]
붉은색	⋮					
풀 색	⋮					
보라색	⋮					

2) 실험으로부터 결정된 3가지색의 파장값과 교과서에 지적된 파장값을 비교하고 오차원인을 밝힌다.

과 제

1. 우의 실험에서 실틈과 에돌이살창사이거리를 작게 할 때와 멀리 할 때 어떤 차이가 있겠는가? 만일 L을 작게 할 때 파장을 정확히 구하는 식을 이끌어내여라.
2. 에돌이살창상수가 크면 실험에서 어떤 영향이 있겠는가?

실험 5. 빛전기현상의 연구

목적. 이 실험에서는 빛전자관음극에 입사하는 빛흐름과 빛전류사이관계를 연구한다.

기초지식. 빛전자관에 전압을 걸고 일정한 빛을 쪼여주면 빛전류가 흐른다. 빛흐름이 일정하면 단위시간동안에 튀여나오는 빛전자의 수도 일정하다.

전압이 낮으면 튀여나온 빛전자가 모두 양극에 끌려들어가지 못하고 일부만 끌려간다. 전압을 점차 높임에 따라 양극에 도달하는 빛전자의 수는 늘어나며 빛전류의 세기도 커진다. 어떤 전압에 이르면 단위시간동안 튀여나오는 빛전자들이 모두 양극에 도달하므로 빛전류는 더는 커지지 않고 포화된다.

포화빛전류의 세기 i는 빛흐름 Φ에 비례한다. 즉 $i \sim \Phi$

광원의 빛세기를 I, 광원과 빛전자관까지 거리를 r_0, 빛전자관의 음극면적을 S

라고 하면 빛흐름은 다음과 같다.

$$\Phi_0 = \frac{IS}{r_0^2} \quad (1)$$

만일 임의의 거리 r_n에서 빛흐름을 Φ_n이라고 하면

$$\Phi_n = \frac{IS}{r_n^2} \quad (2)$$

이므로 식 1, 2로부터

$$\Phi_n = \Phi_0 \frac{r_0^2}{r_n^2} \quad (3)$$

이 선다. Φ_0이 일정하다고 하면 $\Phi_n \sim \frac{r_0^2}{r_n^2}$이다.

이로부터 $\frac{r_0^2}{r_n^2}$에 따르는 빛전류를 측정하면 빛전류의 세기가 빛흐름에 비례한다는것을 확증할수 있다.

기구 및 재료. 광학대(빛전자관, 광원, 고정대 2개), 직류전원(150V), 전압계(직류 200V), 전류계(200μA)

그림 10. 빛전자관과 광원

실험방법

1) 그림 10과 같이 광학대우에 빛전자관과 광원을 설치한다.
2) 그림 11과 같이 회로를 잇는다.
3) 빛전자관으로부터 r_0=60cm 거리에 광원을 놓고 광원의 빛세기가 일정하게 한다.
   빛전자관에 주는 전압은 120V로 고정한다.
4) 광원을 5cm씩 빛전자관쪽으로 접근시키면서 빛전류 i_n과 그 사이거리 r_n을 측정한다.

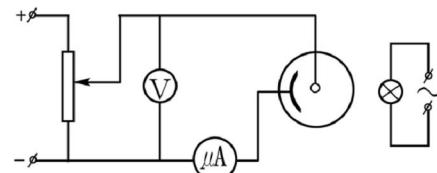
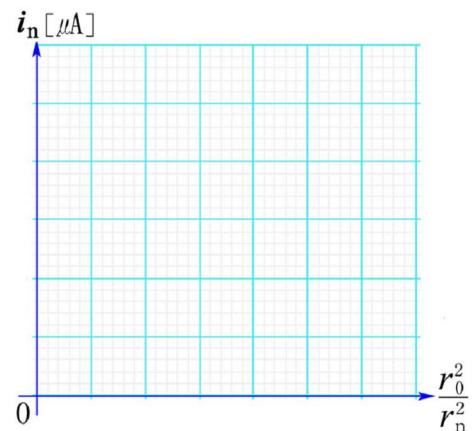



그림 11. 빛전기현상 실험회로

결과 및 분석

1) 측정결과를 다음의 표에 기록한다.

실험번호	r_0	r_n	$\frac{r_0^2}{r_n^2}$	i_n [μA]
⋮				

그림 12. $\frac{r_0^2}{r_n^2}$에 따르는 빛전류세기

2) 빛흐름 즉 $\frac{r_0^2}{r_n^2}$에 따르는 빛전류의 세기 i_n그

라프(그림 12)를 그리고 빛전기현상의 법칙성을 따진다.

과제

1. 실험에서 전압을 더 높여준 상태에서 빛흐름에 따르는 빛전류의 세기의 그라프모양이 어떻게 변하겠는가?
2. 빛흐름의 증가에 따라 빛전류의 세기가 왜 증가하는가?

실험 6. 원자스펙트르 관찰

목적. 이 실험에서는 몇가지 전등의 원자가 내는 선스펙트르를 관찰하고 서로 비교하며 스펙트르의 특징을 따져본다.

기초지식. 원자안에서 전자가 가질수 있는 에네르기값은 불련속이므로 두 에네르기준위의 에네르기차로 결정되는 빛의 파장들도 불련속적인 값을 가진다.

그러므로 원자가 내는 스펙트르는 선스펙트르로 된다.

그런데 원자의 에네르기상태는 원자마다 고유한 특성을 가지므로 같은 종류의 원자가 내보내는 스펙트르는 그 원자의 고유한 특성으로 된다.

매 원자의 고유한 스펙트르의 특성을 찾아내자면 물체를 태워 스펙트르를 관찰함으로써 그 물체가 어떤 원자들로 이루어졌는지 알수 있다. 분광기는 빛을 파장별로 갈라놓으므로 분광기로 스펙트르를 관측할수 있다.

기구 및 재료. 분광기, 나트리움등, 수은등, 네온등, 아르곤등, 고정대, 고압전원장치, 분광기의 파장눈금조명광원

실험방법

1) 그림 13과 같이 기구들을 설치한다.
2) 분광기의 실틈앞에 수은등을 켜고 분광기를 통하여 수은등이 내는 예리한 선스펙트르들이 나타나도록 실틈의 너비와 대안렌즈를 이동시킨다.
3) 눈금달린 대물렌즈앞에 광원을 켜고 스펙트르가 눈금자의 배경속에 놓이도록 한다.
4) 나타난 선스펙트르와 매 자리에서의 파장눈금값을 관측한다.
5) 수은등을 치우고 나트리움등, 네온등, 아르곤등을 차례로 놓을 때마다 나타나는 스펙트르를 관측한다.

그림 13. 원자스펙트르 관측장치

나트리움등이 없을 때는 소금물에 적신 돌솜을 알콜등으로 태우면서 실험할수 있다.

결과 및 분석

1) 매개 광원에서 관측된 선스펙트르를 그리고 그에 대응하는 눈금자에 의한 파장을 표시한 다음 파장에 따르는 빛세기그라프를 대략적으로 그린다.(그림 14)
2) 실험에서 관측된 매개 광원에 대하여 어떤 파장의 빛세기가 제일 큰가를 따진다.
3) 매개 관측된 선스펙트르에 대하여 표준원자스펙트르와 비교한다.

그림 14. 선스펙트르와 파장에 따르는 빛세기

과 제

1. 이 실험장치로 흡수스펙트르를 얻자면 어떻게 하여야 하는가?
2. 분광기의 구조와 원리를 따져보아라.

실험 7. 반도체의 열저항과 온도사이관계 연구

목적. 이 실험에서는 온도에 따르는 반도체의 저항이 어떻게 변하는가를 확인하고 리용방도를 찾는다.

기초지식. 반도체의 저항은 온도에 따라 심하게 변한다. 그것은 반도체가 열을 받으면 전기나르개인 전자와 구멍이 많이 생겨나기때문이다.

반도체의 저항은 온도가 높아짐에 따라 지수함수적으로 줄어든다.

즉 반도체의 열저항값은 온도에 의하여 쉽게 조절된다.

기구 및 재료. 반도체열저항체, 온도계, 비커, 알콜등, 변압기기름, 성냥(혹은 전기인두), 저항계(회로시험기), 반도체3극소자(npn), 작은 전등, 저항(3.9kΩ), 전원(직류 4.5V), 스위치, 방안지

실험방법

1) 그림 15와 같이 비커에 변압기기름을 넣고 그 속에 온도계와 열저항체를 잠근 다음 저항계와 잇는다.
2) 기름을 덥히기 전에 기름의 온도와 열저항체의 저항값을 측정한다.

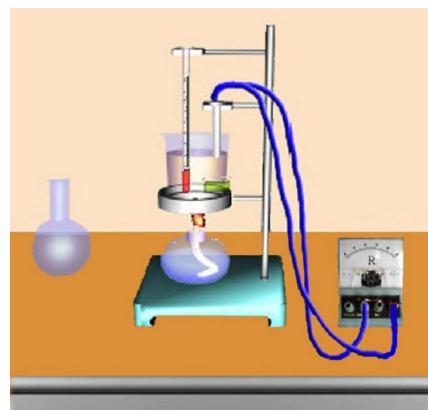



그림 15. 반도체의 열저항과 온도사이관계를 알아보는 실험장치

3) 알콜등에 불을 달고 비커의 기름을 100℃까지 덥히되 5℃ 올라갈 때마다 주어진 온도에서의 저항값을 측정한다.
온도를 잴 때에는 알콜등을 치우고 젓개로 기름을 잘 저운 다음에 잰다.

4) 온도가 100℃까지 올라간 다음에 알콜등을 치우고 온도가 5℃ 내려갈 때마다 저항값을 측정한다.

5) 열저항체를 기름속에서 꺼내여 기름을 잘 닦아낸 다음 그림 16과 같이 회로를 잇는다.

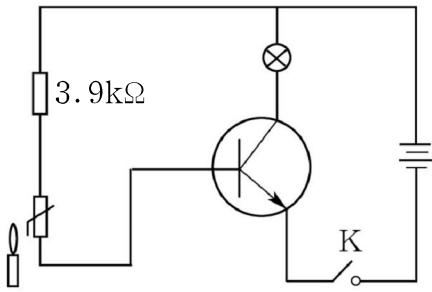



그림 16. 열저항에 의한 3극소자의 작용실험회로

6) 스위치를 닫고 열저항체가까이에 성냥불을 가져간다. 이때 전등에 불이 오는가를 확인한다.

결과 및 분석

1) 온도에 따르는 저항값들을 다음의 표에 기록한다.

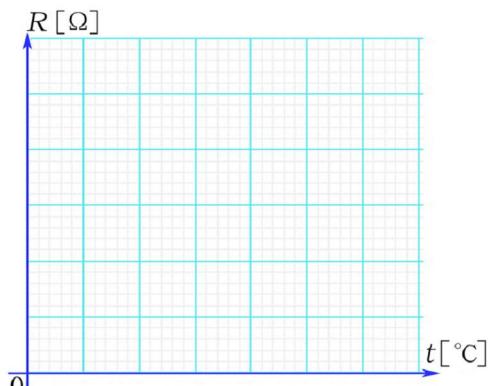
t[℃]						
가열때 R[Ω]						
식힐 때 R[Ω]						

2) 가열할 때와 식힐 때의 측정자료표에 기초하여 온도에 따르는 저항변화그라프를 그린다.(그림 17)

3) 그라프로부터 반도체의 저항과 온도사이에 어떤 관계가 있는가를 찾고 금속의 저항과 온도사이의 관계와 비교한다.

그림 17. 온도에 따르는 저항변화그라프

4) 열저항체가까이에 성냥불을 가져갈 때(그림 16) 전등이 왜 켜지는가를 밝힌다.

과 제

1. 온도가 높아질 때 반도체의 저항이 급격히 작아지는 원인은 무엇인가?
2. 반도체의 열저항의 리용분야를 3가지이상 찾고 화재경보신호장치회로를 그려보아라.

실험 8. 반도체빛저항에 대한 연구

목적. 이 실험에서는 반도체빛저항의 빛수감도를 확인하고 그 리용방도를 찾는다.

기초지식. 반도체에 빛을 쪼이면 쉽게 전자와 구멍쌍을 만들어 전기나르개수가 증가한다.

그러므로 반도체의 저항은 빛을 쪼이면 예민하게 변한다. 반도체빛저항은 비침도에 따라 매우 넓은 범위(수Ω～수MΩ)에서 변한다.

그리고 반도체에 전압을 걸어준 상태에서 빛세기의 증가에 따라 전류는 증가한다.(그림 18)

그림 18. 빛세기에 따르는 전류의 세기 그라프

기구 및 재료. 빛저항체, 손전지, 저항계(회로시험기), 전원(직류 4.5V), npn형3극소자, 스위치, 작은 전등, 저항(1kΩ), 작은 암통

실험방법

1) 빛저항체를 작은 암통속에 넣어 빛이 들어가지 못하도록 한 다음 저항계로 이때의 저항을 잰다.
2) 암통속에서 꺼낸 빛저항체의 저항을 실험실의 밝기상태에서 측정한다.
3) 빛저항체에 손전지를 가까이 대고 빛을 쪼일 때 저항을 측정한다.(그림 19)

그림 19. 빛저항측정회로

4) 그림 20과 같이 반도체3극소자와 빛저항체로회로를 잇는다.
5) 빛저항체에 빛을 쪼일 때와 쪼이지 않을 때 작은 전등에 불이 어떻게 켜지는가를 살펴본다.

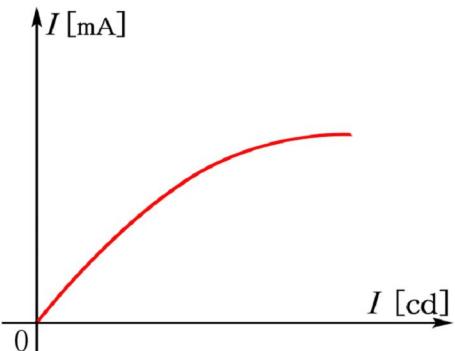
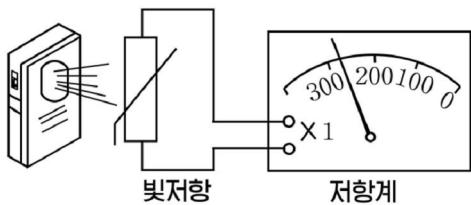
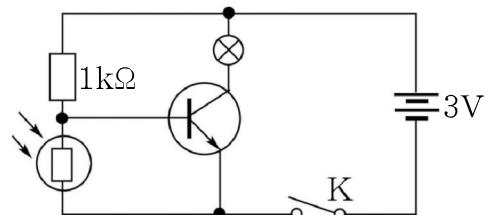



그림 20. 빛저항에 의한 3극소자의 작용실험회로

결과 및 분석

1) 측정된 값을 다음의 표에 기록하고 해당한 결론을 내린다.

상태	암통속에 넣은 경우	실험실밝기의 경우	손전지로 빛을 쪼인 경우
R[Ω]			

2) 3극소자와 빛저항이 련결된 회로(그림 20)에서 빛을 쪼일 때 작은 전등의 불이 달라지는 원인을 찾는다. 그리고 회로에서 3극소자의 작용을 설명한다.

과 제

1. 그림 20과 같은 회로를 어떤 장치에 리용할수 있는가?
2. 빛저항을 쓴 빛계전기를 그려보아라.

실험 9. 반도체2극소자의 전압-전류특성 연구

목적. 이 실험에서는 반도체2극소자에 바른방향 및 거꿀방향전압을 걸어줄 때 전압에 따르는 전류특성을 확증한다.

기초지식. 반도체2극소자에 바른방향전압을 걸어주었을 때 턱전압보다 높은 전압이 걸리면 소자는 열린다. 턱전압은 규소인 경우 0.6V, 게르마니움인 경우 0.4V이다. 그러므로 2극소자가 열린 경우 전류의 세기가 커져도 거기에 걸리는 전압은 턱전압정도에서 변하지 않으며 밖에서 걸어주는 전압의 대부분은 2극소자와 직렬로 련결된 저항에 걸린다.

2극소자에 거꿀방향전압이 걸리면 그의 저항은 수MΩ정도로 매우 커지므로 매우 작은 거꿀전류가 흐른다.

2극소자의 전압-전류특성을 연구할 때 0.6V 근방에서 전압을 조금씩 변화시키면서 정밀하게 측정해야 하므로 내부저항이 매우 큰 전자관전압계나 수자식전압계 혹은 오씰로그라프를 리용하여야 한다.

일반전압계는 내부저항(수십 kΩ)이 그리 크지 않기때문에 반도체소자에 병렬로 련결하면 그의 영향으로 정확한 전압을 측정하지 못하게 되며 오차가 커진다.

그러나 전자관전압계나 수자식전압계, 오씰로그라프는 내부저항이 매우 크므로 (수십MΩ) 측정회로에 영향을 주지 않는다.

기구 및 재료. 축전지(건전지 3V), 직류전원(20V), 2극소자, 가변저항기(10kΩ), 저항(470Ω, 1kΩ), 전압계(전자관전압계 혹은 수자식전압계, 오씰로그라프), 직류전류계(100mA, 200μA), 스위치, 련결선, 방안지

실험방법

1) 먼저 2극소자에 바른방향전압을 걸어주었을 때 전류-전압특성을 연구하기 위하여 그림 21과 같이 회로를 잇는다. 전류계의 측정한계는 100mA, 전압계의 측정한계는 3V로 놓는다.

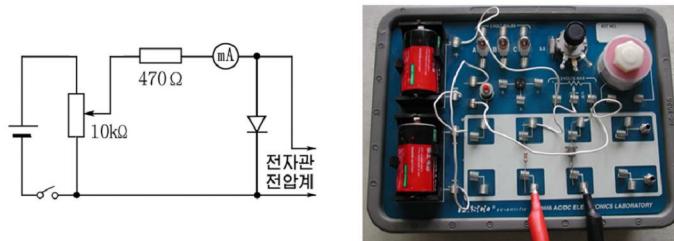



그림 21. 2극소자의 바른방향 특성실험회로

2) 가변저항기의 저항이 최소가 되도록 조절한 다음 스위치를 닫는다. 이때 2극소자에는 0V의 전압이 걸린다.

3) 가변저항을 조금씩 증가시켜 2극소자에 걸리는 전압을 0.1V씩 높이면서 전압계와 전류계의 눈금값을 표에 기록한다. 전류계의 바늘이 움직이기 시작하면 전압을 0.05V씩 증가시키면서 전류를 측정한다.

4) 다음으로 2극소자에 거꿀방향전압을 걸어주었을 때 전압-전류특성을 연구하기 위하여 그림 22와 같이 회로를 잇는다. 전원은 직류전원(0∼20V)으로, 전류계는 직류전류계(200μA)로 바꾸어놓는다.

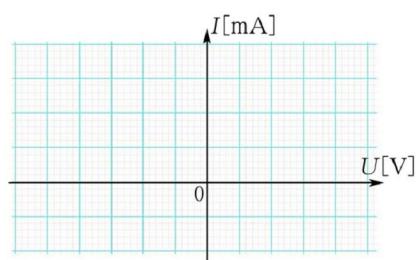
그림 22. 반도체 2극소자의 거꿀방향특성실험회로

5) 거꿀방향전압을 20V까지 높이되 2V 높아질 때마다 2극소자에 흐르는 약한 거꿀방향전류값을 측정하여 표에 기록한다.

그림 23. 반도체2극소자의 전압에 따르는 전류그라프

결과 및 분석

1) 실험에서 측정된 값을 다음의 표에 기록하고 전압-전류특성그라프를 그린다.(그림 23)

구분	측 정 값										
바른방향	I[mA]										
	I[mA]										
거꿀방향	U[V]										
	I[μA]										

2) 2극소자의 특성곡선에서 닫긴 구간, 비례구간, 포화구간을 찾고 원인을 찾는다. 그리고 실험에서 얻은 결론과 느낀 점을 쓴다.

과제

1. 2극소자에 흐르는 전류가 포화되였을 때 저항은 얼마인가를 실험자료에 기초하여 구하여라. 그리고 저항(470Ω)에 걸린 전압을 측정하여보고 2극소자가 열리면 왜 저항에 거의 모든 전압이 걸리는가를 설명하여라.
2. 그림 21의 회로에서 2극소자를 발광2극소자로 바꾸고 바른방향전압을 걸어주었을 때 턱전압이 얼마인가를 측정하여보아라.

실험 10. 반도체2극소자의 정류작용 연구

목적. 이 실험에서는 교류를 직류로 바꾸는 정류회로의 작용원리를 확증한다.

기초지식. 그림 24의 ㄱ와 같은 반파정류회로에서 축전기가 부하저항에 련결되지 않았을 때 2극소자는 교류전압의 +반주기동안에만 부하저항으로 전류가 흐르게 한다.

따라서 출구전압은 맥동전압으로 된다. 부하저항과 축전기를 병렬로 이으면 맥동전압은 평활된다. 그것은 정류기의 출구전압이 축전기의 단자전압보다 클 때에는 충전되고 작을 때에는 부하저항을 통해 방전된다. 그러므로 맥동전압은 평활된다.(그림 24의 ㄴ)

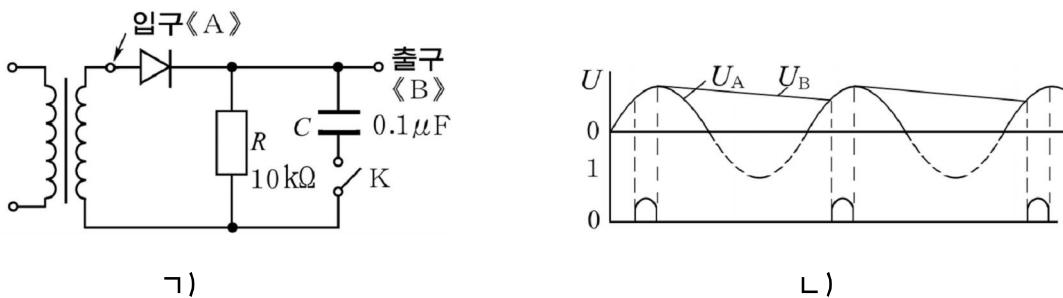



그림 24. 반파정류회로

평활축전기의 용량이 클수록 더 많은 전기량이 쌓이고 부하저항이 클수록 천천히 방전되므로 출구로는 변화가 적은 직류를 얻을수 있다.

기구 및 재료. 정류소자, 전원(교류 3V), 저항(500Ω, 1kΩ, 5.1kΩ, 10kΩ,

20kΩ), 오씰로그라프, 전해축전기(470μF, 100 μF, 20 μF, 5 μF, 0.1 μF), 직류전압계, 방안지

실험방법

1) 그림 24의 ㄱ와 같이 정류회로를 잇는다.
2) 스위치 K를 열어놓은 상태에서 입구 A와 출구 B에서의 전압파형을 오씰로그라프를 통하여 보고 그린다. 이때 입구전압과 출구전압의 진폭을 오씰로그라프에서 정확히 측정한다.
3) 전기용량이 C=0.1 μF인 축전기가 련결된 상태에서 출구와 접지사이에 오씰로그라프와 병렬로 직류전압계를 련결한 다음 스위치 K를 닫고 출구전압의 파형을 관측하고 직류전압을 측정한다.
4) 전기용량이 5 μF, 20 μF, 100 μF, 470 μF인 축전기들을 차례로 바꾸면서 출구전압의 파형에서 생기는 변화를 우에서 그린 파형그라프에 련이어 표시하고 전압계에 나타난 직류전압을 측정한다.
5) 전기용량이 20 μF인 축전기를 고정시킨 상태에서 부하저항을 500Ω, 1kΩ, 5.1kΩ, 10kΩ, 20kΩ으로 바꾸면서 출구전압의 파형변화를 보고 그린 다음 부하저항의 크기에 따르는 직류전압을 측정한다.

그림 25. 입구와 출구전압의 전압파형그라프

결과 및 분석

1) 입구전압과 출구의 맥동전압파형그라프(그림 25)
   (1) 맥동전압의 파형이 왜 나타나는가를 따진다.
   (2) 입구와 출구에서 전압의 진폭이 얼마나 차이나며 왜 그런가를 따진다.
2) 축전기의 전기용량변화에 따르는 출구전압파형변화그라프와 출구직류전압(그림 26)

C [μF]	0.1	5	20	100	470
$U_{직}$[V]					

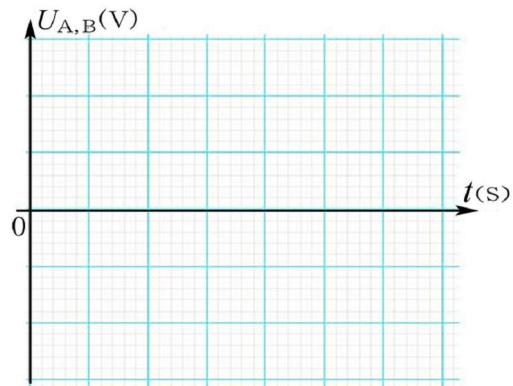
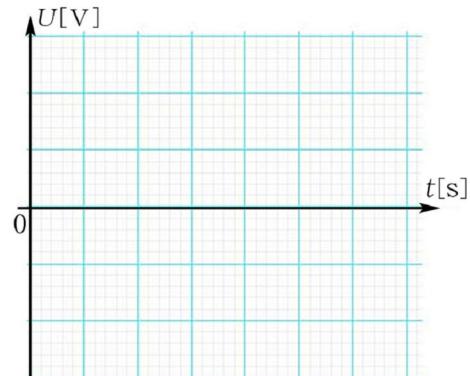



그림 26. 축전기의 전기용량변화에 따르는 출구전압파형변화그라프

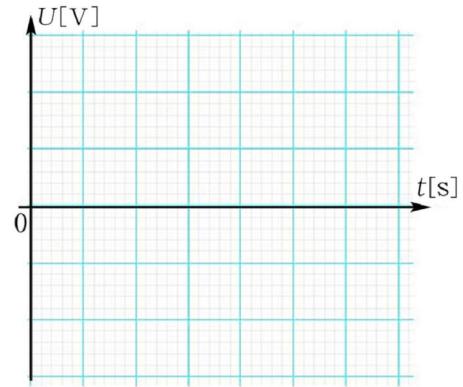
(1) 축전기를 련결하지 않았을 때와 련결했을 때 출구전압파형이 왜 달라지는

가를 따진다.

(2) 축전기의 전기용량변화에 따라 출구전압파형과 출구직류전압값이 왜 달라지는가를 따진다.

3) 부하저항의 변화에 따르는 출구전압파형그라프와 출구직류전압(그림 27)

그림 27. 부하저항의 변화에 따르는 출구전압파형그라프

$R_{부하}$ [kΩ]	0.5	1	5.1	10	20
$U_{직}$[V]					

부하저항의 변화에 따라 출구전압파형과 출구직류전압이 왜 달라지는가를 따진다.

과 제

1. 반파정류회로를 써서 12V의 직류전압을 얻으려고 한다. 이때 변압기2차권선의 전압은 얼마로 해야 하는가?
2. 2극소자 2개 또는 4개를 써서 리용하는 전파정류회로를 그리고 정류과정을 따져보아라.

실험 11. 반도체3극소자에 대한 기초실험

목적. 이 실험에서는 반도체3극소자의 닫김과 열림, 포화상태 그리고 입구와 출구신호의 자리각변화를 확인한다.

기초지식. 반도체3극소자의 기초극과 방사극사이 전압 U_{BE}이 0.6V보다 작게 걸리면 반도체3극소자는 닫기고 그보다 조금 높아도 열린다.

소자가 닫길 때 기초극전류는 흐르지 않으며 수전극전류도 령이다. 이때 방사극과 수전극사이전압(U_{CE})은 전원전압과 같다.

소자가 열리면 방사극-수전극사이로 전류가 흐르며 기초극에 걸어준 전압의 증가에 따라 수전극전류도 증가하며 어떤 값에 이르면 포화된다.

반도체3극소자가 포화되였을 때 방사극과 수전극사이의 전압은 0.1V정도로

된다.

기초극에 직각임풀스 혹은 시누스파를 넣으면 출구전압의 자리각은 180° 만큼 변한다. 그리고 반도체3극소자가 포화된 상태에서는 입구에 교류시누스파를 준 경우 그의 전압을 증가시킬 때 수전극에 나타난 신호는 웃부분이 잘리워지게 나타난다.

기구 및 재료. npn형3극소자, 가변저항기(100Ω), 저항(2kΩ, 1kΩ), 직류전원(3V, 6V), 교류전원(3V), 전압계(전자관전압계), 쌍선오씰로그라프, 스위치, 회로조립판, 련결선, 방안지

실험방법

1) 먼저 반도체3극소자의 열림, 닫김상태를 확인한다.

(1) 회로조립판에 그림 28과 같이 회로를 잇는다. 회로를 이을 때 주어진 npn형3극소자의 방사극, 기초극, 수전극을 정확히 가려내여 이어야 한다.

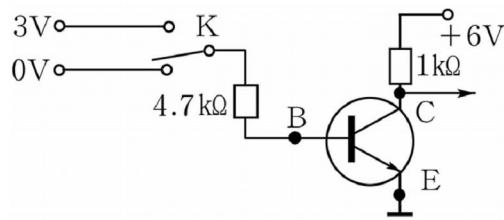



그림 28. 3극소자의 열림과 닫김 알아보기회로

(2) 스위치 K를 0V 위치에 놓는다. 전자관전압계로 기초극(B점)과 수전극(C점)의 전압을 각각 측정한다. 전압은 오씰로그라프로 측정할수도 있다.

(3) 스위치 K를 3V 위치에 놓은 다음 기초극과 수전극의 전압을 각각 측정한다.

2) 입구와 출구에서의 자리각변화와 포화상태를 확인한다.

(1) 그림 29와 같이 회로를 잇는다. 입구전원은 교류이다. 그리고 쌍선오씰로그라프의 입구 1에는 기초극 B와 방사극을 잇고 입구 2에는 수전극 C와 방사극을 잇는다.

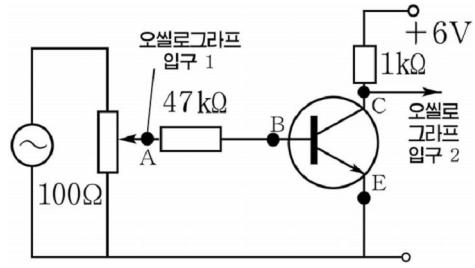



그림 29. 입구와 출구에서 신호의 자리각변화와 포화상태 알아보기회로

(2) 가변저항기의 저항을 최소로 놓고 스위치를 닫는다.

(3) 가변저항을 조절하여 입구교류전압을 증가시킬 때 기초극과 수전극에서의 신호파형과 자리각변화를 오씰로그라프를 통해 관측하고 기록한다.

(4) 입구교류신호전압을 최대로 증가시킬 때(포화되였을 때) 입구파형과 출구파형을 관측하고 그린다.

결과 및 분석

그림 30. 입구와 출구신호의 자리각변화

1) 열림 및 닫김상태의 경우
   (1) 입구전압(기초극전압)이 령인 경우와 최대인 경우 기초극과 수전극의 전압을 각각 기록하고 왜 그런가를 따진다.
   (2) 수전극전압이 0.1V정도이고 기초극전압이 0.6~0.7V정도이면 3극소자가 어떤 동작상태에 있는 경우인가를 따진다.

2) 입구와 출구에서의 신호전압자리각변화와 포화상태의 전압
   (1) 3극소자가 포화되지 않은 상태에서 입구와 출구에서의 신호전압파형을 그리고(그림 30) 그의 자리각변화가 어떤가를 따진다.
   (2) 소자가 포화되였을 때 출구전압파형을 그리고 왜 그런가를 따진다.(그림 31)

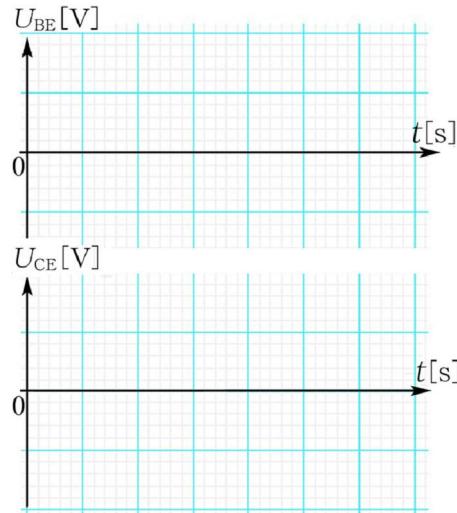
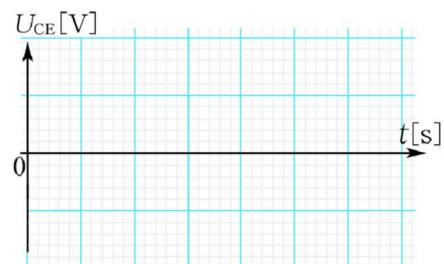



그림 31. 포화된 상태에서 입구와 출구신호의 자리각변화

과 제

1. 우의 실험에서 입구에 교류신호를 주면 출구에는 왜 반파정류된 맥동전류가 나오는가?
2. 그림 32와 같은 전압고정편의회로에서 기초극에 걸린 전압은 얼마이겠는가?

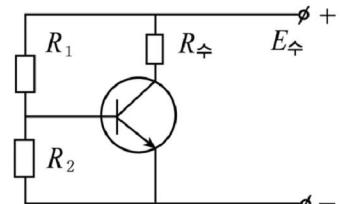



그림 32. 전압고정편의회로

실험 12. 반도체3극소자의 특성 연구

목적. 이 실험에서는 3극소자의 기초극전압에 따르는 기초극전류와 기초극전류에 따르는 수전극전류의 변화를 따져본다.

그림 33. 공통방사극회로

기초지식. 반도체3극소자의 특성은 기초극특성곡선과 수전극특성곡선으로 밝혀진다. 공통방사극회로에서 기초극에 0.6V정도의 전압이 걸리면 소자는 열린다.(그림 33)

이때 기초극전압을 조금만 증가시켜도 기초극전류는 2극소자와 마찬가지로 지수함수적으로 증가한다.(그림 34)

그림 34. 3 극소자의 기초극특성곡선

3극소자가 열리면 수전극전류는 기초극전류에 비례하여 증가하다가 어떤 값에 이르면 더는 증가되지 않고 포화된다.(그림 35) 이때 비례구간에서 전류증폭결수는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

이로부터 기초극전압에 따르는 기초극전류와 그에 따르는 수전극전류특성곡선을 보고 3극소자의 닫긴구간, 포화구간을 결정할수 있으며 전류증폭결수를 구할수 있다.

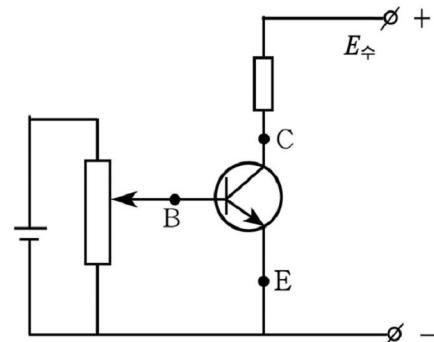
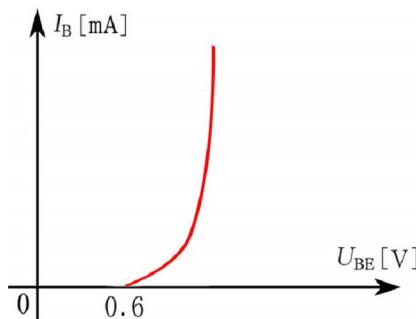
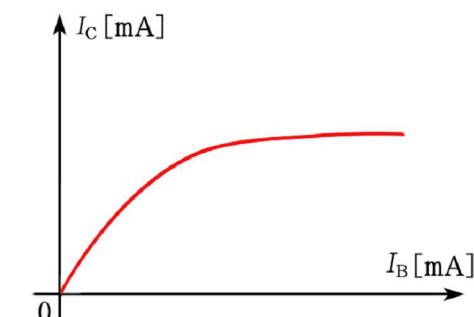
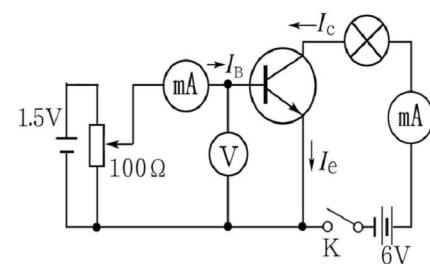
그림 35. 3극소자의 수전극특성곡선

기구 및 재료. npn형3극소자, 가변저항기(100Ω), 전원(1.5V, 6V), 작은 전등, 전류계(10mA, 200mA), 전압계(전자관전압계 또는 수자식전압계, 오씰로그라프), 스위치, 방안지

실험방법

1) 그림 36과 같이 회로조립판에 회로를 잇는다. 여기서 기초극전압은 전자관전압계 혹은 오씰로그라프로 측정해야 한다. 그리고 전류계의 측정범위는 기초극에는 10mA, 수전극에는 200mA에 놓는다.

그림 36. 3극소자의 특성측정회로

2) 가변저항을 최소로 놓은 상태에서 스위치 K를 닫는다.

3) 가변저항기의 저항을 변화시켜 기초극전압을 령으로부터 점차 증가시킨다. 3극소자가 열리기 전까지는 0.2V씩 전압을 높이면서 전류계를 살펴본다.

4) 3극소자가 열리는 기초극전압(작은 전등에 불이 켜지는 때)을 기록하고 이때부터 기초극전압을 0.02～0.05V씩 높이면서 그때마다 기초극전압, 기초극전류 그리고 수전극전류를 표에 기록한다. 수전극전류가 더는 늘지 않고 포화되면 입구전압을 더 올리지 않는다.

결과 및 분석

1) 측정된 값을 다음의 표에 기록하고 기초극특성곡선($U_{BE}-I_B$)과 수전극특성곡선(I_B-I_C)그라프를 그린다.(그림 37)

U_{BE}[V]	0	0.2	0.4	0.6	0.65	0.7	0.75	0.77	0.79	0.81	0.83
I_B[mA]											
I_C[mA]											

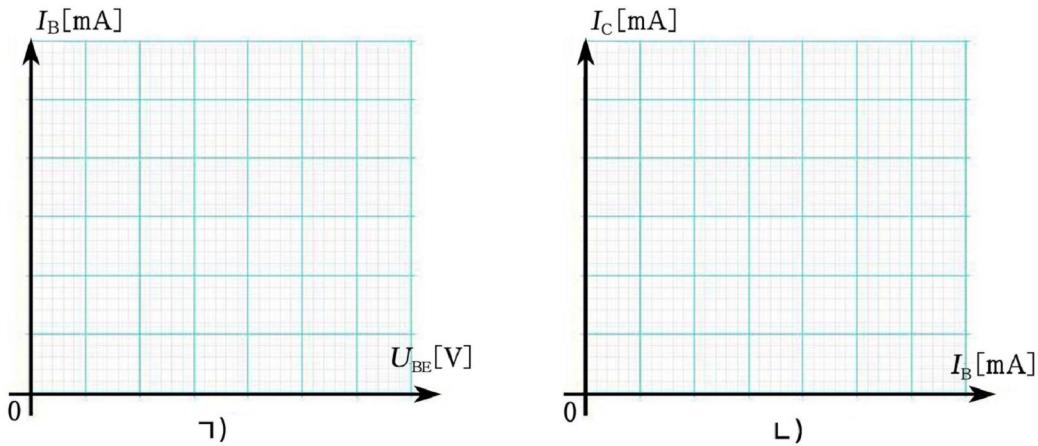



그림 37. 3극소자의 기초극 및 수전극특성곡선

2) 특성곡선에서 3극소자의 닫긴구간, 비례구간, 포화구간을 찾고 그 리유를 밝힌다.

3) 비례구간에서 전류증폭결수 $\beta=\dfrac{I_C}{I_B}$ 를 구하고 그의 평균값, 절대오차, 상대오차를 구한다.

과 제

1. 우의 실험에서 방사극에 200mA이상의 전류계를 직렬련결하고 기초극, 수전극, 방사극에 흐르는 전류관계를 실험으로 확증하여보아라.
2. 반도체3극소자에서는 왜 수전극전류가 기초극전압이 아니라 기초극전류에 의해 조절된다고 하는가?

콤퓨터실험 13. 레이자빛에 의한 실틈의 너비결정

목적. 이 실험에서는 한개 실틈을 통과한 빛의 에돌이무늬를 관측하고 빛의 세기를 측정함으로써 실틈의 너비를 결정한다.

기초지식. 레이자빛이 한개 실틈을 통과하면 빛의 에돌이에 의해서 실틈뒤에 놓인 막에는 밝고(극대) 어두운(극소) 간섭무늬가 생긴다.

극대조건 $$d\sin\alpha = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \qquad (1)$$

극소조건 $$d\sin\alpha = k\lambda \qquad (2)$$

이로부터 극소인 경우 실틈의 너비는 다음과 같이 주어진다.

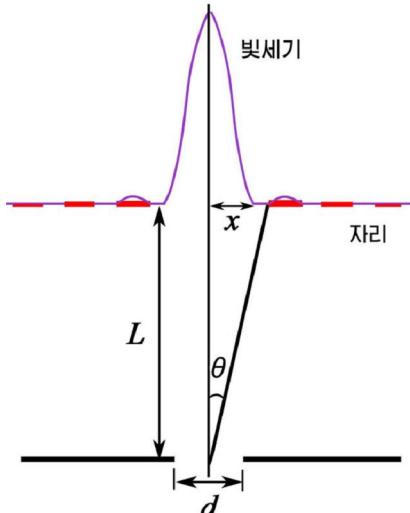
$$d = \frac{\sqrt{x^2 + L^2}}{x}k\lambda \qquad (3)$$

여기서 d는 실틈의 너비, x는 비춤판의 중심점으로부터 극소자리까지의 거리 그리고 L은 실틈과 비춤판까지의 거리이다.(그림 38) 이로부터 빛의 에돌이간섭무늬를 얻어 k차 극소자리까지의 거리 x와 비춤판까지의 거리를 측정하면 실틈의 너비를 결정할수 있다.

한개 실틈을 지나는 에돌이간섭무늬의 빛세기를 측정하기 위해 빛수감부를 리용하고 그의 자리를 측정하기 위해 회전운동수감부를 리용한다.

실험자료분석프로그람(data studio)을 리용하여 자리에 따르는 빛세기그라프를 펼치여 자료를 분석한다.

그림 38. 한개 실틈에 의한 에돌이빛의 세기

기구 및 재료. 콤퓨터입구결합장치, 콤퓨터, 빛수감부, 회전운동수감부, 종합실틈판, 반도체레이자장치, 선형변환기, 기하광학대

실험방법

1) 콤퓨터설치

(1) 콤퓨터입구결합장치를 콤퓨터에 련결하고 전원스위치를 닫는다.

(2) 입구결합장치의 상사통로 A에 빛수감부를 련결한다.

(3) 회전운동수감부의 련결부를 입구결합장치의 수자통로 1, 2에 련결한다.(그림 39)

그림 39. 콤퓨터입구결합장치에 수감부 련결

(4) 실험자료분석프로그람 <data studio>파일을 열고 실험설치창의 수감부목록에서 빛수감부와 회전운동수감부를 선택한다. 화면에 자리에 따르는 빛세

기그라프를 펼친다.

2) 수감부와 기구설치

(1) 기하광학대의 오른쪽끝에 반도체레이자장치를 설치한다.

(2) 반도체레이자장치앞에 종합실틈판을 설치한다.

(3) 회전운동수감부옆에 있는 구멍을 통하여 선형변환기를 끼워넣고 나사로 조인다.

회전운동수감부를 그림 40과 같이 받침대에 고정시킨다.

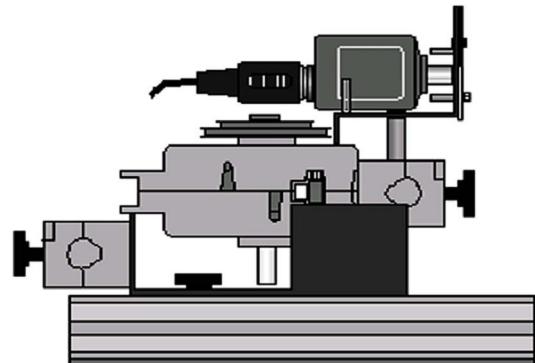
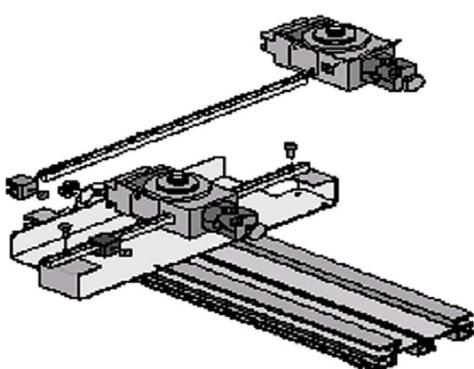



그림 40. 광학대우에 회전운동수감장치 설치　　그림 41. 회전운동수감부에 빛수감부 설치

(4) 빛수감부를 회전운동수감부에 설치한다.(그림 41)

(5) 실틈과 빛수감부의 흰 막사이의 거리가 1m 되도록 하고(그림 42) 자료를 표에 기록한다.

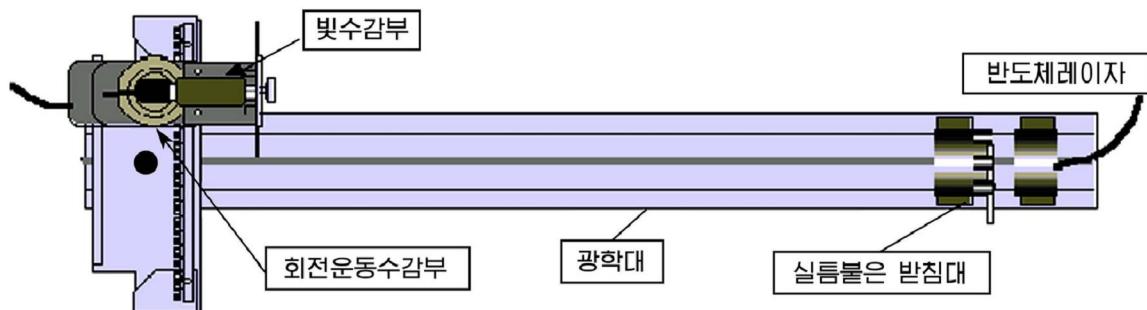



그림 42. 한개 실틈에 의한 에돌이간섭무늬측정장치

레이자장치의 전원스위치를 닫는다. 종합실틈판에서 한개 실틈을 통하여 레이자빛이 빛수감부의 비춤판에 정확히 비쳐지도록(그림 43) 실틈의 위치를 조절한다.

그림 43. 빛수감부의 비춤판에 비쳐진 에돌이무늬

3) 자료기록

(1) 실험설치창의 안내띠에서 시작(start)단추를 눌러 자료기록을 시작한다.

(2) 에돌이무늬의 극대들이 빛수감부의 작은 틈을 지나가도록 회전운동수감부를 천천히 움직인다. 이때 그라프에는 자리에 따르는 극대, 극소빛세기가 펼쳐진다.(그림 44)

(3) 실험설치창의 안내띠에서 정지(stop) 단추를 눌러 자료기록을 끝낸다.

그림 44. 자리에 따르는 간섭무늬의 빛세기변화

결과 및 분석

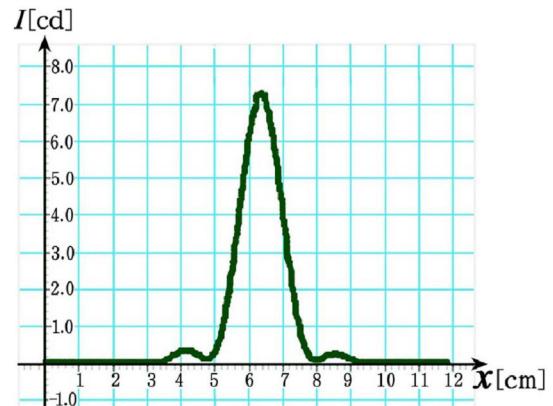
1) 화면에 나타난 그라프의 자료를 정확하게 볼수 있도록 알맞춤하게 확대한다.

2) 그라프창의 안내띠에서 그라프의 매 점에서의 값을 지정하는 도구 <Smart Tool> 단추를 선택한다. 그리고 마우스를 움직여 중심극대의 자리로부터 k차극소자리까지의 위치를 선택하여 나타난 값을 표에 기록한다.

3) 실험설치창의 안내띠에서 계산<Calculate> 단추(Calculate)를 선택하고 식 3을 입력하여 측정자료에 기초하여 실름너비를 구한다.

4) 측정자료

레이자빛의 파장 λ=633nm

실틈과 흰 막사이의 거리 L[m]?

차수 k	거리x[m]	실틈너비 d[mm]
1		
2		
3		
4		

5) 측정자료에 기초하여 다음의 물음에 대답한다.

(1) 실틈을 통과한 에돌이빛의 세기가 자리에 따라 다른 원인은 무엇인가?

(2) 차수에 따라 측정된 실틈너비의 평균값은 얼마인가?

※ 두개 실틈인 경우 실틈사이간격, 파장, 비춤판까지의 거리, 차수 관계식을 세우고 우와 같은 실험기록과 분석과정을 반복하여본다.

찾아보기

전자기체	182	electron gas	электронный газ
전자반도체	209	donor-type semiconductor	электронный полупроводник
전자사태	194	electron avalanche	лавина электронов
전자층	127	electron shell	электронная оболочка
전해질용액	189	electrolytic solution	электролитический раствор
절대성	82	absoluteness	абсолютность
접촉전위차	212	contact potential difference	контактная разность потенциалов
정상상태	120	stationary state	стационарное состояние
정상파조건	120	condition of stationary wave	условие стационарной волны
정지질량	93	rest mass	масса покоя
정지에네르기	96	rest energy	энергия покоя
종속방전	193	dependent	зависимый разряд
주극대	55	principal maximum	главный максимум
주개준위	209	extrinsic semiconductor	примесный полупроводник
주량자수	124	principal quantum number	главное квантовое число
중성자	138	neutron	нейтрон
중성자탄	168	neutron bomb	нейтронная бомба
질량결손	142	mass defect	дефект массы
집적소자	227	chip	микросхема , ЧИП
제동복사	132	bremsstrahlung	тормозное излучение
찬빛	233	luminescence	люминесценция
초고압	243	superhigh pressure	сверхвысокое давление
초기량자리론	120	classical quantum theory	классическая квантовая теория
초전도	239	superconduction	сверхпроводимость
초점면	11	focal plane	фокальная плоскость
충만띠	204	filled band	заполненная зона
코로나방전	199	corona (discharge)	коронный разряд
턱전압	215	threshold voltage	пороговое напряжение

편찬위원회

김용진, 김영인, 한성일, 강영백, 박석원,

김창선, 류해동, 윤명실

총편집 박사 부교수 리종호

물 리(제1중학교 제6학년용)
3판

집 필 **박사 부교수 리종호,**
박사 부교수 김광일, 박석원,
리경치, 신현철, 리학철,
리익선, 박경인, 부교수 김성기,
부교수 리재섭, 리평남

심 사 **심의위원회**

편집 및 콤퓨터편성 **김영숙**

장 정 **백현민**　　교 정

낸 곳 **교육도서출판사**

인쇄소

1판발행 주체96(2007)년 10월 22일

2판인쇄 주체99(2010)년 4월 2일　　2판발행 주체99(2010)년 4월 12일

3판인쇄 주체101(2012)년 월 일　　3판발행 주체101(2012)년 월 일

교-　　부　　값 원